



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Sistema d'instrumentació d'una bancada d'assaig de motors elèctrics

MEMÒRIA

Titulació:

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

Alumne:

Jose Torres Abellán

Director:

Jaume Saura Perise

Convocatòria:

Maig 2019

Resum

En el següent projecte es troba detallat el desenvolupament d'un software per la simulació de càrregues mecàniques a partir d'un motor de corrent continu d'excitació independent instal·lat en un banc d'assaig. Aquesta plataforma docent es troba al *Laboratori d'accionaments elèctrics (057)* a l'aula 058 i té com a fi l'assaig del variador que controla el motor acoblat al motor de corrent continu que actua com a fre.

Per obtenir un control de parell desitjat, primerament és necessari obtenir les característiques del motor per realitzar el seu modelatge i poder aplicar el controlador més adient. Darrerament un dels punts fonamentals d'aquest control és la correcta adquisició de dades dels sensors implementats en el banc d'assaig i el desenvolupament del software. Finalment es planteja una proposta per la realització d'una millora en el banc d'assaig a causa de l'antiguitat que té.

Abstract

In the following project is detailed the development of a software for the simulation of mechanical loads with a direct current motor with independent excitation installed in the test bench. This educational platform is located at the *Laboratori d'accionaments elèctrics (057)* in the class 058 and the finality is the test of the inverter that controls the motor that is connected to the direct current motor that works like a brake.

To obtain the desired control of the torque, first of all it is necessary to obtain the characteristics of the motor for made its modelation and could applicate the best control. Furthermore one of the most important point of this control is the right data acquisition of the sensors installed in the test bench and the software development. The last step is do a proposal for the realization of an improvement in the test bench because it is worn out.

Sumari

Resum.....	2
Abstract	2
Sumari.....	3
Llista de figures	6
Llista d'equacions	9
Llista de gràfics	12
Llista de taules.....	13
Glossari acrònims i abreviatures	14
Introducció	15
Objectiu.....	15
Requeriment	15
1. Marc teòric.....	16
1.1 Motor de corrent continu d'excitació independent	16
1.1.1 Descripció.....	16
1.1.2 Equacions del motor DC.....	17
1.1.3 Modelització del motor DC.....	18
1.1.4 Obtenció dels paràmetres del Motor de Corrent Continu.....	21
1.1.4.1 Resistència del debanat de l'induït (R_i).....	21
1.1.4.2 Inductància del debanat de l'induït (L_i).....	22
1.1.4.3 Constant de temps elèctric (τ_e)	23
1.1.4.4 Constant de parell (K_t).....	23
1.1.4.5 Constant de la força contra-electromotriu (K_e)	24
1.1.4.6 Constant de temps mecànic (τ_m)	24
1.1.4.7 Moment d'inèrcia (J_m).....	25

1.1.4.8 Corrent d'arrancada (I _{arr})	26
1.1.4.9 Parell de fricció (P _f)	26
1.1.4.10 Constant de fricció de Coulomb (B)	26
1.2 Controlador.....	27
1.2.1 Controlador PI.....	29
1.3 Simulació	33
1.3.1 Resposta del sistema a parell constant	33
1.3.2 Resposta del sistema a parell lineal	34
1.3.3 Resposta del sistema a parell quadràtic	35
2. Desenvolupament de l'aplicació	36
2.1 Elements banc d'assaig.....	36
2.1.1 Part mecànica.....	36
2.1.2 Sensoreria	38
2.1.2.1 Cèl·lula de càrrega.....	38
2.1.2.2 Dinamo tacomètrica	41
2.1.3 Controladors	42
2.1.3.1 Hardware.....	42
2.1.3.2 Software	43
2.1.4 Convertidors	45
2.2 Muntatge	47
2.3 Funcionament.....	53
2.4 Adquisició de dades	60
2.4.1 Freqüència de mostreig	60
2.4.2 Filtratge.....	61
2.4.3 Calibratge	68

2.5 Ajust controlador	72
2.5.1 Ziegler Nichols	72
2.5.2 Mètode experimental de prova i error	75
2.6 Resultats	76
2.6.1 Parell constant	76
2.6.2 Parell lineal	77
2.6.3 Parell quadràtic	78
3. Proposta	80
3.1 Part mecànica	80
3.2 Part elèctrica	82
3.3 Sensoreria	83
3.4 Controlador	85
4. Conclusions	87
5. Bibliografia	88

Llista de figures

Fig. 1 Diagrama esquemàtic d'un motor DC d'excitació independent.....	17
Fig. 2 Mesures de la resistència de l'induït	21
Fig. 3 Forces que actuen en la mesura del parell	23
Fig. 4 Diagrama de blocs en llaç tancat del sistema amb controlador	27
Fig. 5 Parell constant	28
Fig. 6 Parell lineal	29
Fig. 7 Parell quadràtic.....	29
Fig. 8 Diagrama de blocs en llaç tancat del sistema sense controlador	30
Fig. 9 Proteccions i explosionat del banc d'assaig amb SolidWorks.....	37
Fig. 10 Elements mecànics del banc d'assaig	37
Fig. 11 Galga extensiomètrica i Pont de Wheastone	39
Fig. 12 Actuació de forces en la cèl·lula de càrrega i pes aplicat en la cèl·lula de càrrega utilitzada	39
Fig. 13 Forces que actuen en la mesura del parell.....	40
Fig. 14 TXDIN1600S de Omega	40
Fig. 15 Dinamo tacomètrica	41
Fig. 16 DS1104 R&D Controller Board	43
Fig. 17 Distribució d'entrades i sortides	43
Fig. 18 Pantalla del ControlDesk	44
Fig. 19 Programació a partir del Simulink	45
Fig. 20 Variador ER-PLX20, Eurotherm.....	46
Fig. 21 Esquema elèctric de la part de potència	47
Fig. 22 Endoll d'alimentació trifàsic del laboratori	48
Fig. 23 Cable per connexió entre la xarxa d'alimentació i el convertidor	48

Fig. 24 Connexió de la part de potència del convertidor.....	48
Fig. 25 Connexió del motor de CC al convertidor	49
Fig. 26 Connector IEC del variador.....	49
Fig. 27 Connexió del pont entre L1,L2,L3 i EL1,EL2,EL3	50
Fig. 28 Distribució dels connectors de control del convertidor	51
Fig. 29 Connexió del divisor de tensió	51
Fig. 30 Connexió del condicionador de senyal per cèl·lula de càrrega.....	52
Fig. 31 Connexió de la sortida analògica del convertidor i connexions dels panells CP1104	52
Fig. 32 Connector PCI	53
Fig. 33 Direccionament del Matlab	54
Fig. 34 Interfície Simulink, ubicació del compilador	54
Fig. 35 Interfície ControlDesk, "Open project + Experiment .."	55
Fig. 36 Obrir l'experiment "Control_de_Parell_Panell_Virtual".....	56
Fig. 37 Interfície ControlDesk, "Go online" "Start Measuring"	56
Fig. 38 Distribució dels paràmetres dels panells virtuals del ControlDesk.....	57
Fig. 39 Panell virtual del control de parell constant.....	58
Fig. 40 Panell virtual del control de parell lineal.....	59
Fig. 41 Panell virtual del control de parell quadràtic	60
Fig. 42 Resposta en freqüència gràfica d'un filtre passa baixos	62
Fig. 43 Resposta en freqüència gràfica d'un filtre passa alt.....	62
Fig. 44 Resposta en freqüència gràfica d'un filtre passa banda	63
Fig. 45 Resposta en freqüència gràfica d'un filtre elimina banda.....	63
Fig. 46 Circuit operacional integral que actua com a filtre passa baixos	65
Fig. 47 Implementació del filtre passa baixos en el Simulink.....	66
Fig. 48 Mesura de la velocitat del motor a partir d'un tacòmetre	68

Fig. 49 Massa coneguda penjada de la cèl·lula de càrrega.....	69
Fig. 50 Calibratge del condicionador de senyal <i>TXDIN1600S</i> d'Omega.....	70
Fig. 51 Massa coneguda aplicada a la cèl·lula de càrrega	70
Fig. 52 Resposta del sistema determinant els paràmetres L i T	73
Fig. 53 Proposta part mecànica del banc d'assaig	81
Fig. 54 Proposta part mecànica del banc d'assaig amb explosionat	81
Fig. 55 Distribució d'elements del quadre elèctric.....	82
Fig. 56 Part frontal del quadre elèctric	83
Fig. 57 Transductor de parell T22.....	84
Fig. 58 Autòmat CPU-1212C i mòdul d'entrada analògiques.....	85
Fig. 59 Pantalla KTP 400	86

Llista d'equacions

Equació 1 Llei de Kirchoff en el circuit de l'induït.....	17
Equació 2 Part mecànica del motor de CC.....	17
Equació 3 Posició angular	17
Equació 4 Desenvolupament de l'equació (2).....	17
Equació 5 Potència en l'eix.....	18
Equació 6 Potència en l'induït.....	18
Equació 7 Flux generat per el camp d'excitació.....	18
Equació 8 Desenvolupament equació (6).....	18
Equació 9 Igualació entre les constants de la força contra-electromotriu i la de parell.....	18
Equació 10 Funció de transferència desitjada	18
Equació 11 Conversió en el domini de Laplace de l'equació (1).....	19
Equació 12 Conversió en el domini de Laplace de l'equació (5).....	19
Equació 13 Corrent de l'induït.....	19
Equació 14 Substitució de l'equació (12) al corrent de l'induït.....	19
Equació 15 Conversió en el domini de Laplace de l'equació (4).....	19
Equació 16 Conversió en el domini de Laplace de l'equació (8).....	19
Equació 17 Igualació de l'equació (15) i (16).....	19
Equació 18 Substitució de l'intensitat de l'induït en l'equació 15	20
Equació 19 Velocitat angular	20
Equació 20 Intensitat de l'induït substituint la velocitat angular	20
Equació 21 Desenvolupament de l'equació (20).....	20
Equació 22 Intensitat de l'induït.....	20
Equació 23 Funció de transferència	20

Equació 24 Inductància	22
Equació 25 Inductància del debanat del induït	22
Equació 26 Inductància a partir de la constant de temps elèctric (t_e).....	23
Equació 27 Constant de temps elèctric (t_e)	23
Equació 28 Parell mecànic	23
Equació 29 Constant de parell.....	24
Equació 30 Constant de temps mecànic (t_m)	25
Equació 31 Moment d'inèrcia (J_m)	25
Equació 32 Parell de fricció (P_f).....	26
Equació 33 Parell constant.....	28
Equació 34 Parell lineal	28
Equació 35 Parell quadràtic.....	29
Equació 36 Funció de transferència de la planta del sistema	29
Equació 37 Llaç de realimentació	30
Equació 38 Teorema del Valor Final.....	30
Equació 39 Funció de transferència de l'error	30
Equació 40 Teorema del valor final al sistema en llaç tancat	30
Equació 41 Funció de transferència del controlador PI	31
Equació 42 Funció de transferència del sistema controlat en llaç tancat.....	31
Equació 43 Desenvolupament de l'equació 39	31
Equació 44 Polinomi característic d'una funció de transferència de segon ordre	32
Equació 45 Coeficient d'esmoreïment	32
Equació 46 Freqüència natural	32
Equació 47 Igualació de polinomis característics per determinar K_p i K_i	32
Equació 48 Potència mecànica de l'eix motor	33

Equació 49 Parell nominal del motor	33
Equació 50 Teorema de mostreig de Nyquist-Shannon	60
Equació 51 Teorema de mostreig en la pràctica.....	60
Equació 52 Freqüència de mostreig en la pràctica	61
Equació 53 Sample rate mínim per l'adquisició de les senyals.....	61
Equació 54 Funció de transferència circuit integral	65
Equació 55 Intensitats d'entrada i sortida al node V_x	65
Equació 56 Tensió en els nodes.....	65
Equació 57 Desenvolupament de l'equació XX	65
Equació 58 Desenvolupament de l'equació XX	66
Equació 59 Resultat de la funció de transferència del filtre passa baixos	66
Equació 60 Equació calibratge del sensor de velocitat a implementar	69
Equació 61 Equació del calibratge del sensor de parell a implementar en el software	72

Llista de gràfics

Gràfica 1 Captura de l'oscil·loscopi de la tensió i el corrent.....	22
Gràfica 2 Corba de velocitat una vegada es treu l'alimentació del motor	25
Gràfica 3 Resposta de la simulació del sistema a parell i velocitat constant	33
Gràfica 4 Resposta de la simulació del sistema a parell lineal i velocitat lineal	34
Gràfica 5 Resposta de la simulació del sistema a parell quadràtic i velocitat lineal	35
Gràfica 6 Senyal analògica adquirida de la dinamo tacomètrica sense filtre	64
Gràfica 7 Senyal analògica adquirida de la cèl·lula de càrrega sense filtre	64
Gràfica 8 Representació de les senyals adquirides a través de la dinamo tacomètrica amb filtre i sense filtre	67
Gràfica 9 Representació de les senyals adquirides a través de la cèl·lula de càrrega amb filtre i sense filtre.....	67
Gràfica 10 Calibratge dinamo tacomètrica.....	69
Gràfica 11 Calibratge cèl·lula de càrrega	71
Gràfica 12 Resposta del sistema en llaç obert aplicant una entrada graó	73
Gràfica 13 Mètode de Ziegler-Nichols, determinació dels paràmetres L i T.....	74
Gràfica 14 Resposta del sistema aplicant els paràmetres de PI segons el mètode de Zigler-Nichols.....	75
Gràfica 15 Resposta del sistema a parell constant.....	77
Gràfica 16 Resposta del sistema a parell lineal	78
Gràfica 17 Resposta del sistema a parell quadràtic.....	79

Llista de taules

Taula 1 Mesures de la resistència de l'induït	21
Taula 2 Mesures per determinar K_t	24
Taula 3 Mesures per determinar la constant de fricció de Coulomb (B)	27
Taula 4 Mesures adquirides per el calibratge de la dinamo tacomètrica	68
Taula 5 Mesures adquirides per el calibratge de la cèl·lula de càrrega	71
Taula 6 Paràmetres de Ziegler-Nichols mètode del llaç obert	74
Taula 7 Com afecta l'augment de les constants del controlador PID	75

Glossari acrònims i abreviatures

DSP: Processador digital de senyals.

SCADA: Supervisió, control i adquisició de dades.

CC: Corrent continu.

F.E.M: Força electromotriu.

F.C.E.M: Força contraelectromotriu.

PID: Proporcional, integratiu i derivatiu.

PI: Proporcional i integratiu.

Strain (ϵ) : deformació resultant d'aplicar una força. ($\epsilon = \Delta L/L$)

mV: Mil·livolts.

A/D: Analògic / Digital.

D/A: Digital / Analògic.

RTI: Interfície en temps real.

BNC: Tipus de connector utilitzat per cable coaxial.

D-sub: Tipus de connector.

PWM: Modulació per amplada de polsos.

CA: Corrent altern.

HMI: Interfície d'usuari.

HSC: Comptatge ràpid.

Introducció

Objectiu

L'objectiu d'aquest projecte és l'anàlisi dels sensors de velocitat i parell, per la realització del control de parell d'un motor de corrent continu instal·lat en una bancada d'assaig. Aquest control es desenvolupa a partir, de la implementació d'un sistema d'adquisició de dades amb el desenvolupament d'un processador digital de senyals (DSP) a partir del software *Matlab/Simulink* i el control directe de l'usuari amb un SCADA desenvolupat amb *ControlDesk*.

El desenvolupament del software té com a objectiu la interacció de l'usuari sobre el motor de corrent continu per poder simular diferents càrregues mecàniques desitjades sobre el motor que anirà acoblat aquest, amb la intenció d'assajar la capacitat del variador que el controla.

Requeriment

Per la realització dels objectius del projecte, la bancada d'assaig ha de tindre uns requeriments essencials per poder portar-ho a terme. Aquesta plataforma docent ha d'incorporar:

- Motor elèctric de CC, motor que actua com a fre.
- Motor elèctric trifàsic, motor acoblat a assajar.
- Dinamo tacométrica, sensor de velocitat.
- Cèl·lula de càrrega, sensor de parell.
- Variador, component que controla el motor elèctric de CC.
- Processador digital de senyals (DPS), hardware i software per la realització del control.
- Components de conversions de senyals elèctriques.

Els components que conformen el banc d'assaig són reutilitzats per tant no són necessaris requeriments econòmics.

1. Marc teòric

1.1 Motor de corrent continu d'excitació independent

1.1.1 Descripció

Dins de la varietat de les màquines elèctriques que s'utilitzen actualment per realitzar un control, les més convenients són les de corrent continu.

De les diverses aplicacions que tenen les màquines de corrent continu, es destaquen les següents:

- Ajust precís del control de la velocitat.
- Diferent tipus del control del parell a partir de la velocitat.
- Ràpida acceleració, desacceleració i canvi del sentit del gir.
- Possibilitat de treballar en els quatre quadrants.

El motor de CC d'excitació independent és el més adient per a la realització del control sobre aquest gràcies a la connexió independent que existeix entre el camp d'excitació i el camp de l'induït.

Aquest tipus de motor està compost per les següents parts:

- Estator: és un electroimant format per un número parell de pols.
- Rotor: és la part mòbil que gira sobre el seu eix formant un nucli magnètic a través de l'entreferro es separa l'estator.
- Col·lector de delques: és un anell de làmines de coure situat sobre l'eix del rotor que connecta les bobines de l'estator amb el circuit exterior gràcies a les escombretes les quals estan fetes de grafit.

El motor de CC d'excitació independent instal·lat en el banc d'assaig normalment actuarà com a generador donant lloc en l'eix a un parell de frenada, on aquest parell actua en sentit contrari a la velocitat de gir i una força electromotriu (f.e.m) en l'induït que provoca una generació d'energia elèctrica a l'exterior.

1.1.2 Equacions del motor DC

Són quatre les equacions que descriuen el comportament dinàmic d'un motor CC d'excitació independent. Aquestes equacions es basen en les lleis de la dinàmica i de Kirchhoff.

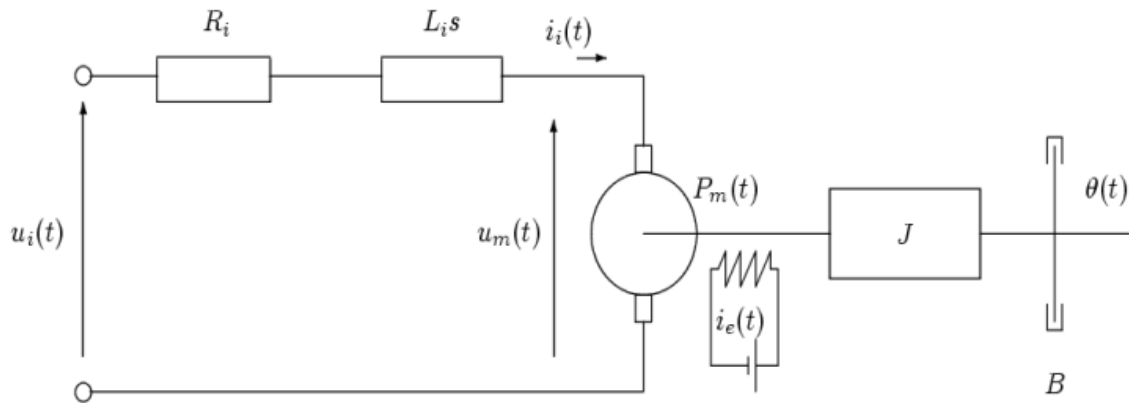


Fig. 1 Diagrama esquemàtic d'un motor DC d'excitació independent

L'equació corresponent a la part elèctrica segons la Fig. (1) és la següent:

Equació 1 Llei de Kirchhoff en el circuit de l'induït

$$u_i(t) = R_i \cdot i_i(t) + L_i \frac{di_i(t)}{dt} + u_m(t)$$

L'equació corresponent a la part mecànica és la següent:

Equació 2 Part mecànica del motor de CC

$$J_m \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = P_m(t) - B \frac{d\theta(t)}{dt}$$

La posició angular es pot escriure com:

Equació 3 Posició angular

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt$$

Desenvolupant i substituint l'equació (3) a l'equació (2):

Equació 4 Desenvolupament de l'equació (2)

$$P_m(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t)$$

Hi ha dues equacions matemàtiques que relacionen la part elèctrica i la part mecànica. Aquestes dues equacions són les següents:

Equació 5 Potència en l'eix

$$u_m(t) = k_e \cdot \omega(t)$$

Equació 6 Potència en l'induït

$$P_m(t) = k_m \cdot \phi \cdot i_i(t)$$

L'equació del flux generat per el camp d'excitació:

Equació 7 Flux generat per el camp d'excitació

$$\phi = k_e \cdot i_e(t)$$

Al ser aquest flux constant l'equació (6) queda de la següent manera:

Equació 8 Desenvolupament equació (6)

$$P_m(t) = k_m \cdot k_e \cdot i_e(t) \cdot i_i(t) = k_t \cdot i_i(t)$$

Es pot determinar una igualtat entre les constants de la força contra-electromotriu (k_e) i la de parell (k_t), ja que en règim estacionari del motor la potència en l'armadura és igual a la potència entregada en l'eix.

Per tant, per la resolució de les equacions:

Equació 9 Igualació entre les constants de la força contra-electromotriu i la de parell

$$K = k_t = k_e$$

1.1.3 Modelització del motor DC

Una vegada determinades totes les equacions matemàtiques del motor de CC, és necessari processar-les per aconseguir la funció de transferència desitjada per poder realitzar una simulació del seu comportament. Com es pretén realitzar un control de parell i aquest és proporcional a la intensitat que circula per l'induït la funció de transferència tindrà la següent forma:

Equació 10 Funció de transferència desitjada

$$H(s) = \frac{I_i(s)}{V_i(s)}$$

Per determinar la funció de transferència de l'equació (10) és necessari convertir les equacions matemàtiques de l'apartat anterior en el domini de Laplace i una vegada convertides manipular-les.

Es converteix l'equació (1) i (5) en el domini de Laplace:

Equació 11 Conversió en el domini de Laplace de l'equació (1)

$$U_i(s) = R_i + L_i \cdot I_i s + U_m$$

Equació 12 Conversió en el domini de Laplace de l'equació (5)

$$U_m = K \cdot \omega$$

A continuació s'aïlla el corrent de l'induït de l'equació (11) i es substitueix a l'equació (12):

Equació 13 Corrent de l'induït

$$I_i(s) = \frac{U_i - U_m}{R_i + L_i \cdot s}$$

Equació 14 Substitució de l'equació (12) al corrent de l'induït

$$I_i(s) = \frac{U_i - K \cdot \omega}{R_i + L_i \cdot s}$$

Una vegada obtinguda la intensitat de l'induït és necessari desenvolupar l'equació (14), ja que la funció de transferència desitjada no depèn de la velocitat. Per tant, es necessari aïllar la velocitat.

Primer es converteix l'equació (4) i (8) en el domini de Laplace:

Equació 15 Conversió en el domini de Laplace de l'equació (4)

$$P_m(s) = J_m \cdot \omega \cdot s + B \cdot \omega$$

Equació 16 Conversió en el domini de Laplace de l'equació (8)

$$P_m = K \cdot I_i$$

S'igualen les equacions (15) i (16):

Equació 17 Igualació de l'equació (15) i (16)

$$J_m \cdot \omega \cdot s + B \cdot \omega = K \cdot I_i$$

Substituint l'equació (14) en la (15) s'obté:

Equació 18 Substitució de l'intensitat de l'induït en l'equació 15

$$K \cdot \frac{U_i - K \cdot \omega}{R_i + L_i \cdot s} = (J_m + B) \cdot \omega$$

Aïllant la velocitat queda la següent equació:

Equació 19 Velocitat angular

$$\omega(s) = \frac{K \cdot U_i}{(J_m + B)(R_i + L_i \cdot s) + K^2}$$

Per acabar es substitueix l'equació (19) en l'equació (14):

Equació 20 Intensitat de l'induït substituint la velocitat angular

$$I_i(s) = \frac{U_i - K \cdot \frac{K \cdot U_i}{(J_m + B)(R_i + L_i \cdot s) + K^2}}{R_i + L_i \cdot s}$$

Desenvolupant l'equació (20):

Equació 21 Desenvolupament de l'equació (20)

$$I_i(s) = \frac{\frac{U_i \cdot ((J_m \cdot s + B)(R_i + L_i \cdot s) + K^2) - K^2 \cdot U_i}{(J_m \cdot s + B)(R_i + L_i \cdot s) + K^2}}{R_i + L_i \cdot s}$$

On finalment queda com:

Equació 22 Intensitat de l'induït

$$I_i(s) = \frac{U_i \cdot (J_m \cdot s + B)}{(J_m \cdot s + B)(R_i + L_i \cdot s) + K^2}$$

Per aconseguir la funció de transferència de l'equació (10), cal reagrupar termes de l'equació (22), on:

Equació 23 Funció de transferència

$$H(s) = \frac{I_i(s)}{U_i(s)} = \frac{(J_m \cdot s + B)}{(J_m \cdot L_i)s^2 + ((J_m \cdot R_i) + (B \cdot L_i))s + ((B \cdot R_i) + K^2)}$$

1.1.4 Obtenció dels paràmetres del Motor de Corrent Continu

A causa d'utilitzar un banc reutilitzat, el motor de CC d'excitació independent a controlar no incorpora la placa de característiques. Per poder realitzar una simulació a partir del model creat en l'apartat anterior és necessari obtenir les seves característiques. És per això que en aquest apartat s'obtenen els paràmetres experimentalment del motor de CC.

1.1.4.1 Resistència del debanat de l'induït (R_i)

La resistència d'armadura (R_i) s'obté mesurant directament en els terminals del camp d'inducció del motor amb un multímetre. En aquest cas són els cables de color negre i gris. Cal mesura la resistència en diferents posicions del rotor, ja que presenta variacions a causa de l'efecte de les escombretes i delgues.

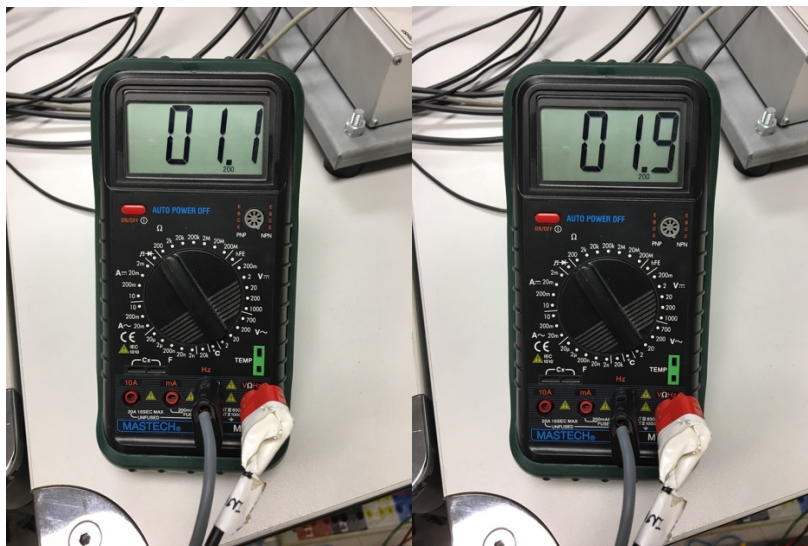


Fig. 2 Mesures de la resistència de l'induït

$R_i \text{ max } (\Omega)$	$R_i \text{ min } (\Omega)$	$R_i (\Omega)$
1,9	1,1	1,5

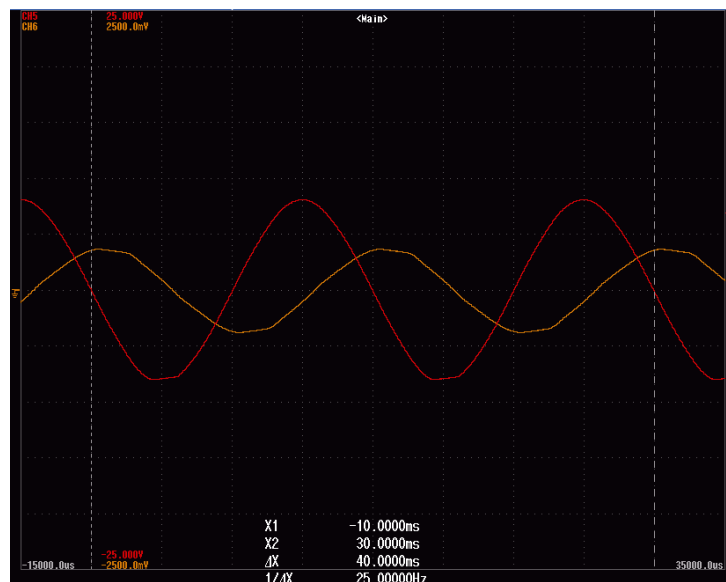
Taula 1 Mesures de la resistència de l'induït

$$R_i = 1,5 \, \Omega$$

1.1.4.2 Inductància del debanat de l'induït (L_i)

La inductància de l'armadura (L_i) també es pot mesurar de forma directa en els terminals del camp d'inducció a partir d'un LCR meter. A causa de no tenir a les nostres instal·lacions un LCR meter s'obté el valor de la inductància de la següent manera:

- Connectar els terminals del camp d'inducció a una font d'alimentació. On s'aplica una corrent alterna de 50Hz al circuit.
- A partir d'un oscil·loscopi mirar la tensió i el corrent màxim del senyal. Aquests valors màxim s'han obtingut a partir del software *Matlab*, extraient els valors de cada canal de l'oscil·loscopi.



Gràfica 1 Captura de l'oscil·loscopi de la tensió i el corrent

$$V_{\text{màx}} = 80,833 \text{ V} ; I_{\text{màx}} = 0,3685 \text{ A}$$

Equació 24 Inductància

$$\frac{V_{\text{màx}}}{I_{\text{màx}}} = |Z| = \sqrt{R^2 + \omega L^2}$$

Equació 25 Inductància del debanat del induït

$$L = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{\text{màx}}}{I_{\text{màx}}}\right)^2 - R_i^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{\left(\frac{80,833}{0,3685}\right)^2 - 1,5^2}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,6982 \text{ H}$$

$$L_i = 0,6982 \text{ H}$$

1.1.4.3 Constant de temps elèctric (t_e)

Una vegada determinat els valors de la resistència i la inductància en els apartats anterior a partir de la següent equació es pot calcular la constant de temps elèctric:

Equació 26 Inductància a partir de la constant de temps elèctric (t_e)

$$L_i = t_e \cdot R_i$$

Equació 27 Constant de temps elèctric (t_e)

$$t_e = \frac{L_i}{R_i} = \frac{0,6982}{1,5} = 0,4655 \text{ s}$$

$$t_e = 0,4655 \text{ s}$$

1.1.4.4 Constant de parell (K_t)

Per determinar la constant de parell (K_t) es realitza a partir de la cèl·lula de càrrega instal·lada al banc. Gràcies aquesta cèl·lula es pot mesura la força que aplica el motor i per tant el parell que aplica.

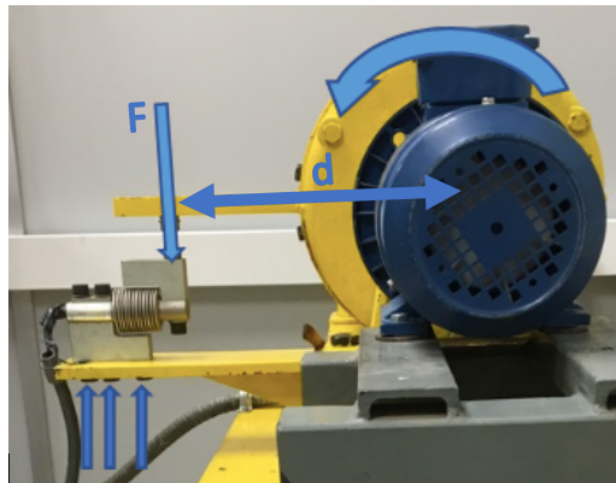


Fig. 3 Forces que actuen en la mesura del parell

Expressió de l'equació:

Equació 28 Parell mecànic

$$P_m = F \cdot d$$

S'iguala l'equació (8) i (28), per aïllar K_t :

Equació 29 Constant de parell

$$K_t = \frac{F \cdot d}{I_i}$$

F (N)	d (mm)	I_i (A)	$K_t \left(\frac{N \cdot m}{A} \right)$
1,75	0,3075	0,95	0,5664
1,83	0,3075	1,00	0,5627
1,89	0,3075	1,03	0,5642
1,92	0,3075	1,05	0,5622
1,70	0,3075	1,06	0,5628

Taula 2 Mesures per determinar K_t

$$K_t = 0,5637 \frac{N \cdot m}{A}$$

1.1.4.5 Constant de la força contra-electromotriu (K_e)

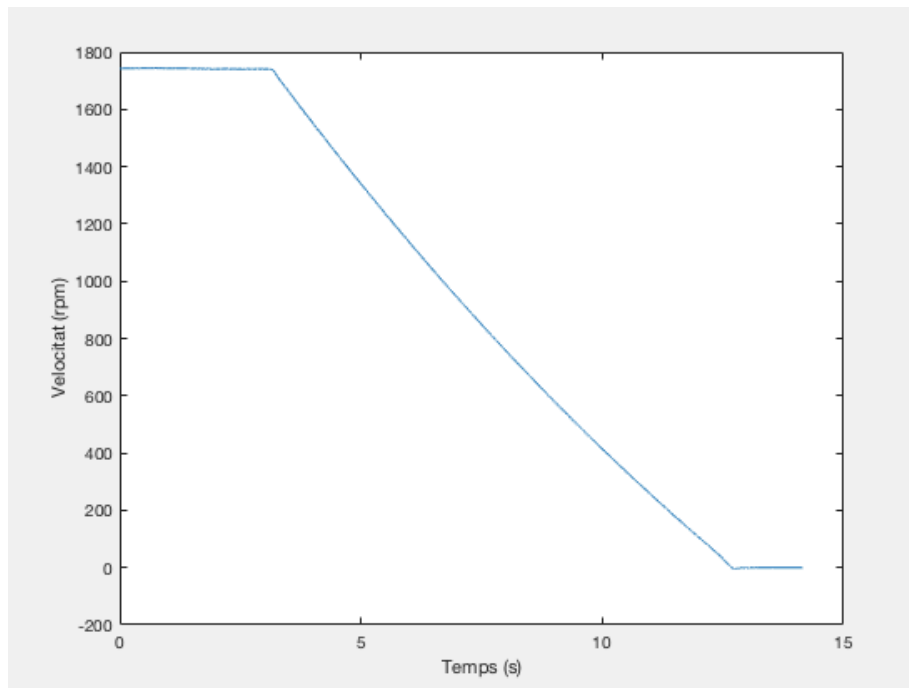
Per determinar la constant de la força contra-electromotriu (K_e) es realitza de manera directa a partir de la igualació de l'equació (9), ja que aquesta és igual a la constant de parell (K_t) per tant:

$$K_e = 0,5637 \frac{V}{rad/s}$$

1.1.4.6 Constant de temps mecànic (t_m)

Per determinar la constant de temps mecànic (t_m) es pot mesurar de dues maneres diferents. La primera, és el temps en què el sistema arriba al 63,2% de la seva velocitat nominal aplicant una tensió graó al motor.

També es pot determinar com un terç del temps que triga entre la desconexió de l'alimentació i la detenció del motor.



Gràfica 2 Corba de velocitat una vegada es treu l'alimentació del motor

Aquesta prova s'ha realitzat cinc vegades on el temps obtingut ha sigut de 3,2s en tots els casos.

$$t_m = 3,2 \text{ s}$$

1.1.4.7 Moment d'inèrcia (J_m)

A partir dels paràmetres obtinguts en els apartats anteriors es pot calcular el moment d'inèrcia (J_m). A través de la següent equació:

Equació 30 Constant de temps mecànic (t_m)

$$t_m = \frac{J_m \cdot R_i}{K_t \cdot K_e}$$

Equació 31 Moment d'inèrcia (J_m)

$$J_m = \frac{t_m \cdot K_t \cdot K_e}{R_i} = \frac{3,2 \cdot 0,5637 \cdot 0,5637}{1,5} = 0,6779 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_m = 0,6779 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

1.1.4.8 Corrent d'arrancada (I_{arr})

El corrent d'arrancada (I_{arr}), és el corrent màxim de l'induït en el moment en què l'eix del motor inicia el seu moviment. Per aconseguir aquest corrent, primer es comença a aplicar tensió a l'induït a partir d'una font d'alimentació variable i gràcies a una pinça amperimetria es capta la intensitat una vegada l'eix del motor inicia el seu moviment.

$$I_{arr} = 0,95 \text{ A}$$

1.1.4.9 Parell de fricció (P_f)

El parell de fricció (P_f) és el parell necessari per vèncer la fricció estàtica, on aquesta és una pèrdua d'energia a causa de l'oposició a l'inici del moviment en les superfícies de contacte. A través de la següent equació es pot determinar aquest paràmetre:

Equació 32 Parell de fricció (P_f)

$$P_f = k_t \cdot I_{arr} = 0,5637 \cdot 0,95 = 0,5355 \text{ Nm}$$

$$P_f = 0,5355 \text{ Nm}$$

1.1.4.10 Constant de fricció de Coulomb (B)

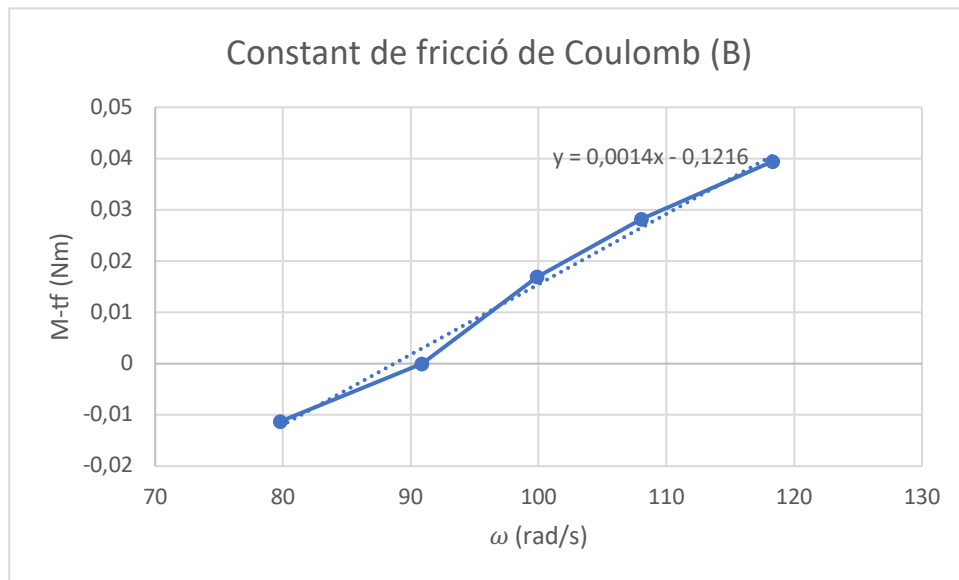
La constant de fricció de Coulomb (B) es determina quan el motor es troba en regim estacionari, en aquest punt el sistema arriba a una velocitat constant i per tant l'acceleració és zero.

Per determinar la constant és necessari realitzar una gràfica de ($M-P_f$) contra la velocitat angular (ω). Una vegada obtinguda la gràfica es realitza una regressió lineal per ajustar la corba i el pendent donat és la constant de fricció de Coulomb (B).

k_t (Nm/A)	I_i (A)	M (Nm)	P_f (Nm)	ω (rad/s)
0,5637	0,93	0,5242	0,5355	79,80
0,5637	0,95	0,5355	0,5355	90,90
0,5637	0,98	0,5524	0,5355	99,90

0,5637	1,00	0,5637	0,5355	108,07
0,5637	1,02	0,5750	0,5355	118,33

Taula 3 Mesures per determinar la constant de fricció de Coulomb (B)



Gràfica 1 Determinació de la constant de fricció de Coulomb (B)

B= 0,0014 Nms

1.2 Controlador

Actualment el controlador o regulador PID és el més comú en l'àmbit industrial. El controlador PID permet controlar un sistema en llaç tancat perquè arribi a l'estat de sortida desitjat. Aquest està compost per tres components que proporcionen una acció de control proporcional, integral i derivativa.

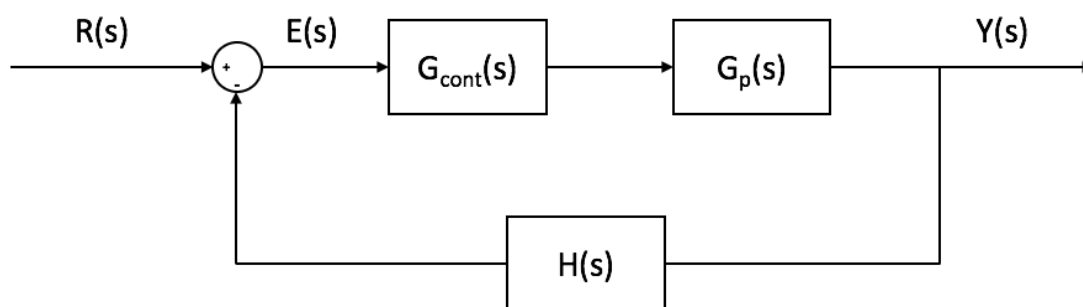


Fig. 4 Diagrama de blocs en llaç tancat del sistema amb controlador

En realitzar el control d'un motor de CC que actua com a càrrega (fre), el control es determina a través del corrent de l'induït. Aquest motor pot actuar en els quatre quadrants, per tant, s'ha incorporat un variador de freqüència de contínua específic perquè sigui capaç de realitzar aquest tipus de control.

Existeixen diferents tipus de corbes de càrregues, aplicades a diferents tipus màquines (cintes transportadores, grues, compressors, ventiladors...). En aquest cas es realitzarà el control de tres tipus de càrregues:

- Parell constant: aquesta càrrega consisteix en mantindre el parell constatat a qualsevol velocitat, on la potència augmenta segons augmenta la seva velocitat. L'aplicació del parell a baixes velocitats pot desencadenar en sobreescalfament al motor.

Equació 33 Parell constant

$$M = cte.$$

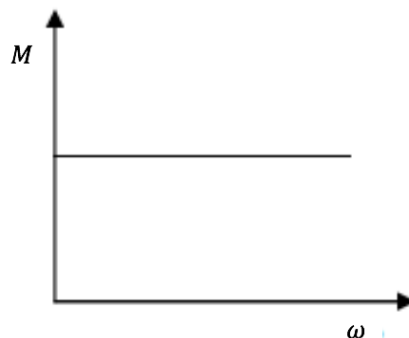


Fig. 5 Parell constant

- Parell lineal: aquest parell varia de forma proporcional a la velocitat, on la potència s'incrementa de forma quadràtica respecte a la velocitat.

Equació 34 Parell lineal

$$M = a + b\omega$$

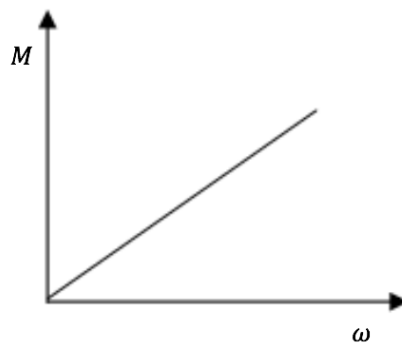


Fig. 6 Parell lineal

- Parell quadràtic: el parell augmenta de forma quadràtica a la velocitat, on la potència evoluciona de manera cúbica amb la velocitat.

Equació 35 Parell quadràtic

$$M = a + b\omega + c\omega^2$$

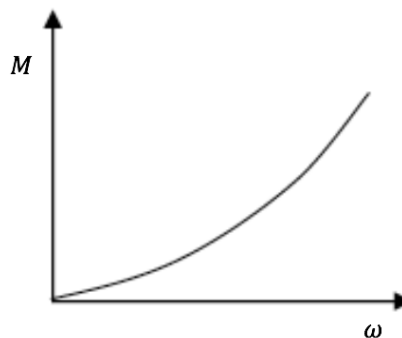


Fig. 7 Parell quadràtic

1.2.1 Controlador PI

Per realitzar el disseny d'un controlador primerament és necessari la identificació del controlador que s'ajusta més a la resposta desitjada del sistema. És necessari trobar l'error estacionari del sistema aplicant un graó unitari. La Fig. (8) mostra el sistema en llaç tancat sense controlador on les funcions de transferència que actuen són les següents:

Equació 36 Funció de transferència de la planta del sistema

$$G_p(s) = \frac{1,4323s + 0,003}{s^2 + 2,1504s + 0,6758}$$

Equació 37 Llaç de realimentació

$$H(s) = 1$$

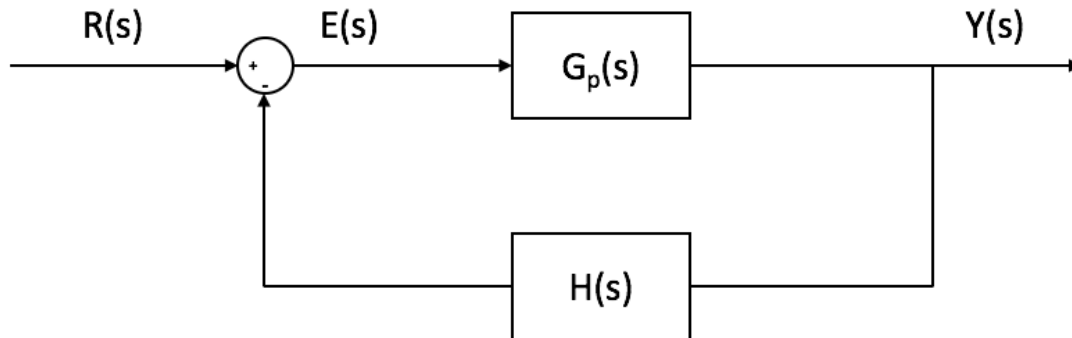


Fig. 8 Diagrama de blocs en llaç tancat del sistema sense controlador

Com s'observa en el diagrama de blocs anterior el senyal d'error és representat com $E(s)$ en el domini transformat on $e(t)$ seria l'equivalent en el domini temporal.

Equació 38 Teorema del Valor Final

$$e(t)|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$$

On l'equació error és:

Equació 39 Funció de transferència de l'error

$$E(s) = \frac{1}{1 + G_p(s)H(s)} R(s) = \frac{1}{1 + \frac{1,4323s + 0,003}{s^2 + 2,1504s + 0,6758}} \cdot \frac{1}{s}$$

Aplicant el Teorema del Valor Final:

Equació 40 Teorema del valor final al sistema en llaç tancat

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + \frac{1,4323s + 0,003}{s^2 + 2,1504s + 0,6758}} \cdot \frac{1}{s} \approx 1$$

El valor de l'error estacionari a l'aplicar un graó unitari al sistema és una constant, per tant s'ha d'aconseguir eliminar aquest error. Gràcies a l'acció de control integral s'aconsegueix reduir l'error del sistema en règim permanent.

A partir de l'acció de control proporcional augmenta la rapidesa de resposta del sistema i també disminueix l'error en regim permanent. L'acció de control derivativa dona estabilitat al sistema però disminueix la seva resposta, per tant no s'utilitzarà aquesta constant, ja que es vol un sistema amb una resposta el més ràpid possible.

El controlador que més s'adapta a les necessitats és el PI, aquest està compost per les constants proporcional (K_p) i integral (K_i).

Equació 41 Funció de transferència del controlador PI

$$G_{cont}(s) = K_p + K_i \cdot \frac{1}{s}$$

A partir del mètode d'assignació de pols es determinen els valors dels paràmetres del regulador. Aquest mètode consisteix a ubicar els pols de la funció de transferència del sistema controlat $G_t(s)$ segons les especificacions desitjades.

Per realitzar el disseny del controlador PI és necessari obtenir la funció de transferència del sistema controlat tancant el llaç (Fig. (4)). Aquesta funció es descriu per la següent equació:

Equació 42 Funció de transferència del sistema controlat en llaç tancat

$$G_t(s) = \frac{G_{cont}(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_{cont}(s) \cdot G_p(s) \cdot H(s)}$$

Es substitueix l'equació (33), (34) i (38) a l'equació (39):

Equació 43 Desenvolupament de l'equació 39

$$\begin{aligned} G_t(s) &= \frac{\left(K_p + K_i \cdot \frac{1}{s}\right) \cdot \left(\frac{1,4323s + 0,003}{s^2 + 2,1504s + 0,6758}\right)}{1 + \left(K_p + K_i \cdot \frac{1}{s}\right) \cdot \left(\frac{1,4323s + 0,003}{s^2 + 2,1504s + 0,6758}\right)} = \\ &= \frac{(K_p s + K_i) \cdot (1,4323s + 0,003)}{s^3 + (2,1504 + 1,4323K_p) s^2 + (0,6758 + 0,003K_p + 1,4323K_i) s + 0,003K_i} \end{aligned}$$

El denominador de la funció de transferència del sistema controlat és el polinomi característic. Aquest polinomi s'ha d'igualar al denominador típic d'una funció de transferència de segon ordre, on s'ha d'afegir un tercer pol aquest, ja que el polinomi característic és de tercer ordre, la seva forma es la següent:

Equació 44 Polinomi característic d'una funció de transferència de segon ordre

$$P_c(s) = (s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2) \cdot (s + a) =$$

$$= s^3 + (2\xi w_n + a)s^2 + (w_n^2 + 2\xi w_n a)s + a w_n^2$$

Les especificacions de la resposta del sistema és aconseguir un sobrepic del $M_p = 20\%$ i un temps d'establiment de $T_{s2\%} = 3$ segons on se suposa que és del 2%.

Seguidament s'interpreten les especificacions desitjades:

Equació 45 Coeficient d'esmoreïment

$$\xi = \frac{(\ln(M_p))^2}{\sqrt{s^2 + (\ln(M_p))^2}} = 0,46$$

Equació 46 Freqüència natural

$$T_{s2\%} = \frac{4}{\xi w_n} = 3s \rightarrow w_n = 2,9 \text{ rad/s}$$

Finalment s'igualen el polinomi característic de la funció de transferència del sistema controlat amb el polinomi característic desitjat:

Equació 47 Igualació de polinomis característics per determinar K_p i K_i

$$s^3 + (2,1504 + 1,4323K_p) s^2 + (0,6758 + 0,003K_p + 1,4323K_i) s + 0,003K_i =$$

$$= s^3 + (2,67 + a)s^2 + (8,41 + 2,67a)s + 8,41a$$

Realitzant un sistema de tres equacions s'obtenen els següents valors per als paràmetres del controlador desitjat:

$$K_p = 0,36$$

$$K_i = 8,41$$

1.3 Simulació

Una vegada trobada la funció de transferència del model del motor i els paràmetres del seu controlador es pot realitzar la simulació del sistema a partir del programa *MatLab* dins de la seva interfície *Simulink*.

A partir d'aquesta simulació es podrà fer una petita estimació dels assajos dels diferents tipus de corbes de parell abans de posar-ho en pràctica.

1.3.1 Resposta del sistema a parell constant

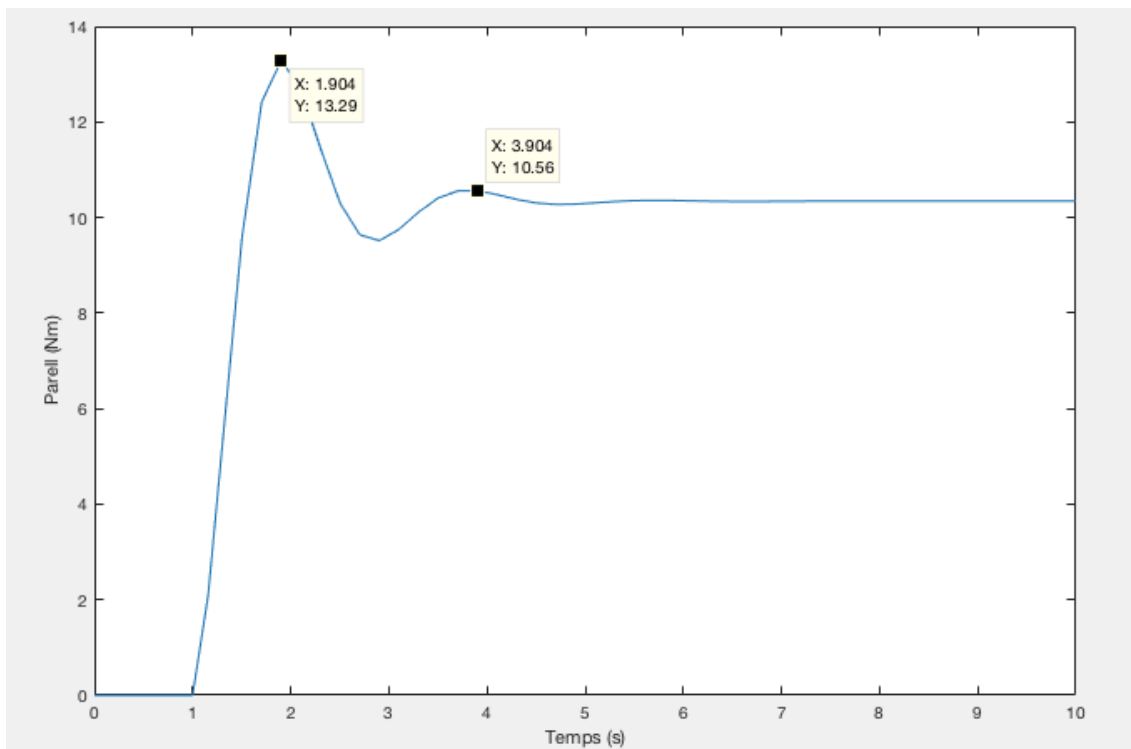
A l'hora d'obtenir la resposta del sistema simulat a parell constant s'ha de realitzar en condicions nominals del motor. S'aplica un graó de parell constant igual al parell nominal on el motor gira a velocitat nominal.

Equació 48 Potència mecànica de l'eix motor

$$P = M \cdot \omega$$

Equació 49 Parell nominal del motor

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{2000}{183,2596} = 10,91 \text{ Nm}$$

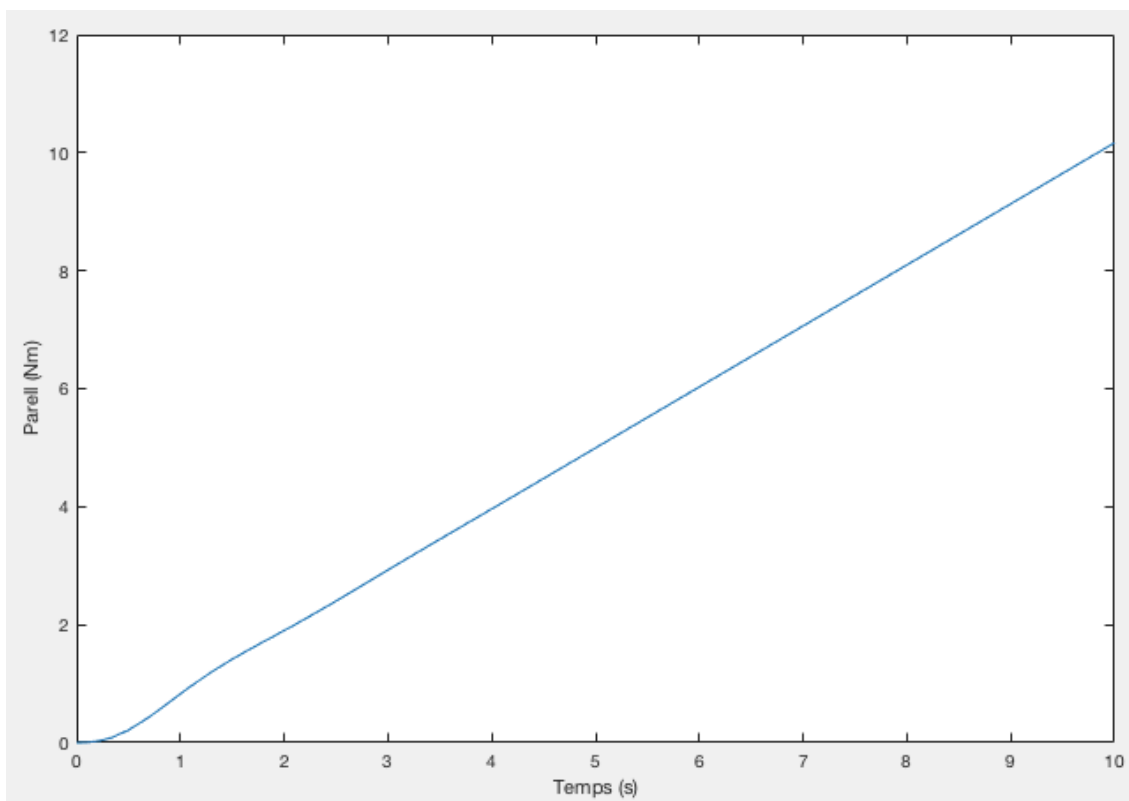


Gràfica 3 Resposta de la simulació del sistema a parell i velocitat constant

La resposta del sistema és similar a les especificacions descrites en l'obtenció dels paràmetres del controlador on el sobrepic és de $M_{p\%} = 21\%$ i el temps d'establiment és de $t_s = 3s$, per tant es pot donar com a correcte el control desitjat del sistema.

1.3.2 Resposta del sistema a parell lineal

Per aconseguir la variació del sistema a parell lineal s'ha aplicat un parell lineal arribant en 10s al seu parell nominal, on s'utilitza una consigna de velocitat lineal arribant a la seva velocitat nominal.

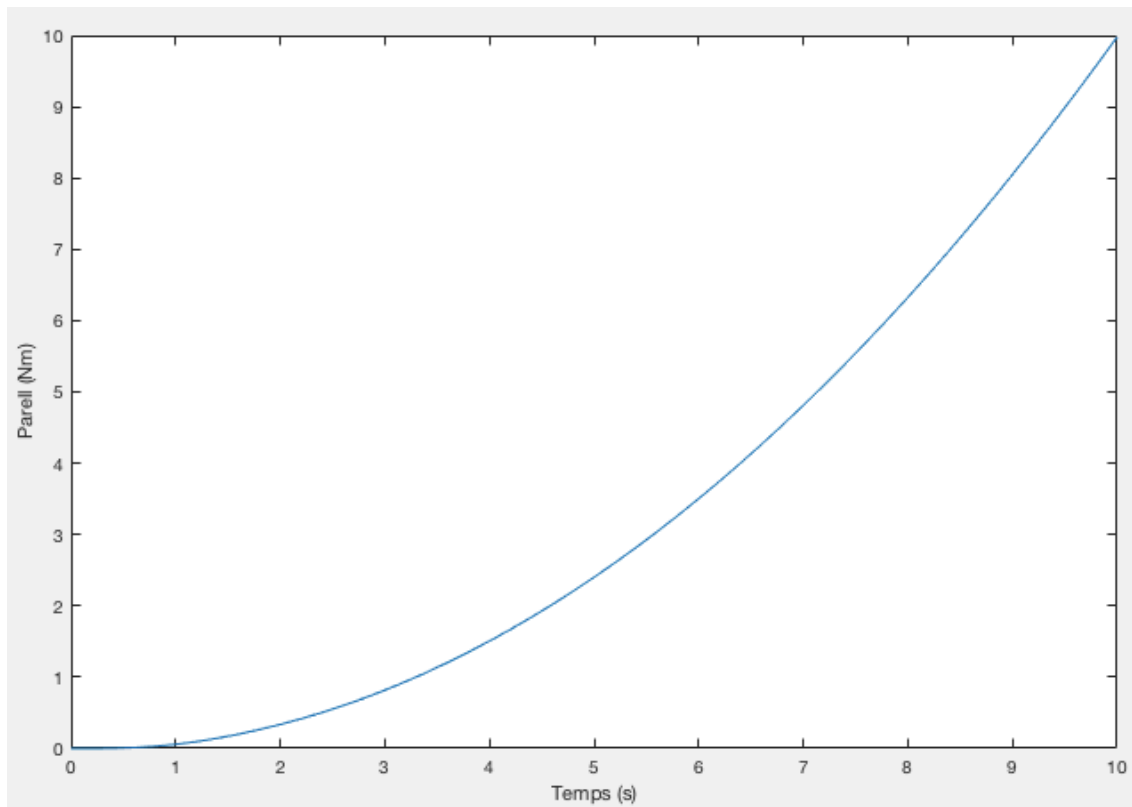


Gràfica 4 Resposta de la simulació del sistema a parell lineal i velocitat lineal

Es pot observar com la resposta del sistema segueix la consigna de parell lineal sense variacions.

1.3.3 Resposta del sistema a parell quadràtic

D'igual manera que l'apartat anterior s'aplica una consigna de velocitat lineal amb un parell quadràtic arribant a les condicions nominals del motor. La resposta del sistema segueix la consigna de parell desitjada, on hi ha un error del 8% en estat estacionari que es considera menyspreable.



Gràfica 5 Resposta de la simulació del sistema a parell quadràtic i velocitat lineal

2. Desenvolupament de l'aplicació

2.1 Elements banc d'assaig

En aquest apartat es descriuen els components que conformen el banc d'assaig, les seves funcions, i els avantatges i desavantatges que tenen.

2.1.1 Part mecànica

Cada banc d'assaig està compost per una part mecànica o estructura que suporta tots els elements que conformen l'assaig, tant dels elements mecànics com dels elements de control.

L'estructura de la bancada utilitzada és fixa i molt robusta. Això és necessari, ja que el motor de CC instal·lat, és molt voluminós i pesat. Dues bigues suporten tot el pes dels components instal·lats. La base d'aquesta estructura està dissenyada per dues bigues i sobre d'aquestes, dues barres rectangulars que fan de suport pel motor de CC i el motor acoblat aquest en aquest cas un motor trifàsic *MEB MS 802-4*. Aquestes barres incorporen uns carrils en la part on s'instal·la el motor trifàsic per poder incorporar altres motors de diferents dimensions. A l'utilitzar aquest motor trifàsic, és necessari incorporar-lo en una estructura per poder acoblar-lo al motor de CC, ja que al ser tan petit els eixos no encaixen. Els dos motors estan units per un acoblament elàstic d'acer, més específicament l'*SR-57, Industrias Albert*.

El motor de CC de 2kW està instal·lat en una carcassa que incorpora una barra. Gràcies aquesta barra el motor pot interaccionar amb la cèl·lula de càrrega i poder captar el parell del motor. La cèl·lula de càrrega està instal·lada en una platina soldada en un lateral dels suports dels motors.

En la part posterior de l'eix del motor de CC hi ha incorporat un disc de 20 pins, per la detecció de la velocitat del motor a partir d'un sensor inductiu i una dinamo tacomètrica.

Totes les parts mòbils, estan protegides per tapes de protecció. En aquest cas, una tapa per la part posterior de l'eix del motor de CC (disc de 20 pins) i un altre per la part d'unió entre eixos dels motors.

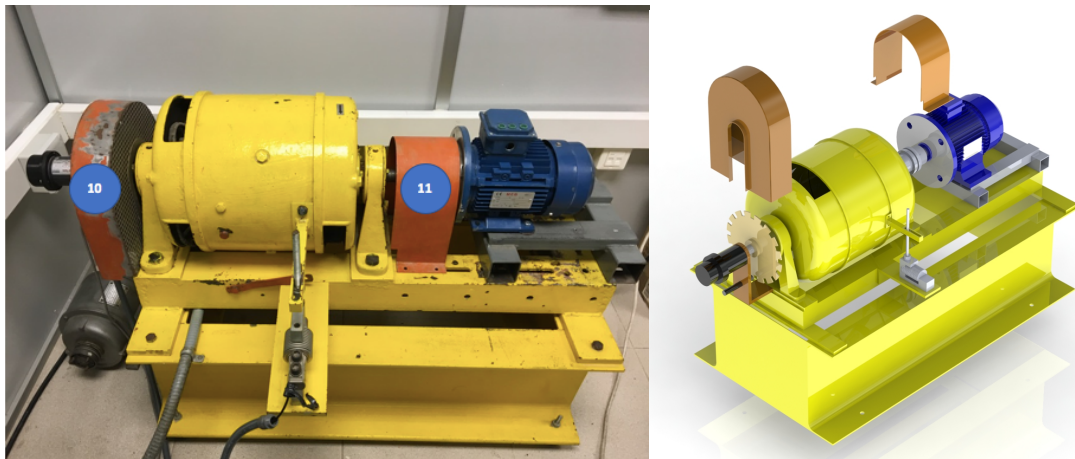


Fig. 9 Proteccions i explosionat del banc d'assaig amb SolidWorks

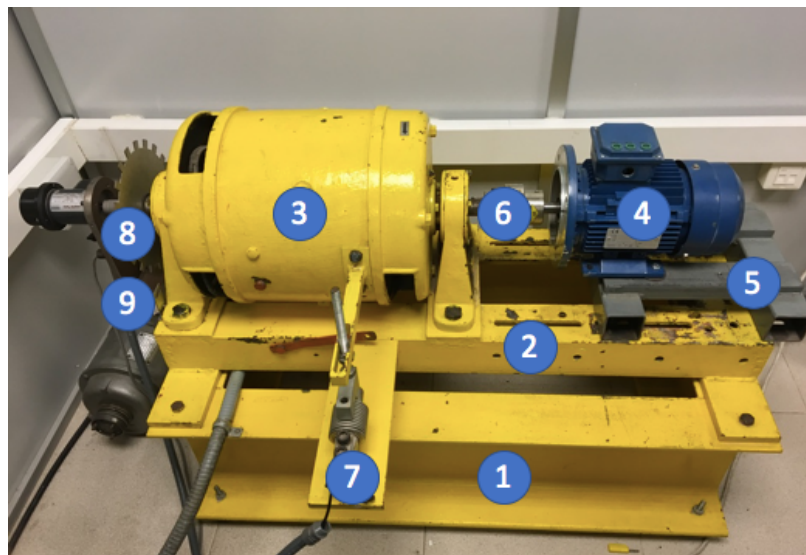


Fig. 10 Elements mecànics del banc d'assaig

1. Base de dues bigues.
2. Suport dels motors, dues barres rectangulars.
3. Motor de CC de 2kW.
4. Motor trifàsic *MEB MS 802-4*.
5. Estructura motor trifàsic.
6. Acoblament elàstic d'acer.
7. Platina cèl·lula de càrrega.
8. Disc de 20 pins.
9. Suport per una dinamo tacomètrica i un sensor inductiu.
10. Tapa de protecció per el disc de 20 pins.
11. Tapa de protecció en l'acoblament dels eixos dels motors.

Avantatges

- Estructura robusta.
- Instal·lació de la sensoreria en la bancada.

Desavantatges

- Estructura fixa i pesada on no incorpora tots els components de la bancada.
- Desconnexió de tots els elements de control que no estan incorporats a la part mecànica (variador, controlador, ...) per moure el banc d'assaig.
- Necessitat d'equipament mecànic per poder traslladar-lo (exemple: transpaleta).
- L'estructura està creada específicament pel motor de CC. En el cas de canviar aquest motor s'haurà de dissenyar un altre suport.

2.1.2 Sensoreria

2.1.2.1 Cèl·lula de càrrega

La cèl·lula de càrrega és un transductor que converteix la força mecànica aplicada sobre ell, en un senyal elèctric proporcional a la força que se li aplica.

El tipus de transductor de parell més comú, són les que utilitzen galgues extensomètriques, on aquestes són compostes d'una resistència de coure integrada en una base que es deforma juntament amb la cèl·lula de càrrega. La deformació fa canviar la seva resistència amb el pas del corrent elèctric (Ω), que es detectada pel circuit elèctric anomenat "Pont de Wheastone" i produeix una variació de mV. Quan augmenta el strain (ϵ), la secció disminueix però la longitud augmenta i per tant augmenta la seva resistència. En el cas que la galga extensomètrica estigui comprimida, la seva resistència disminuirà.

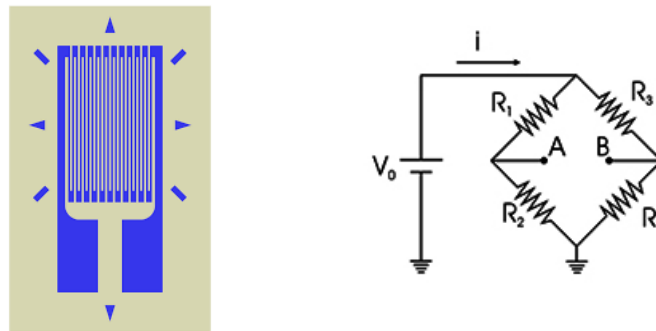


Fig. 11 Galga extensiomètrica i Pont de Wheatstone

En la majoria de cèl·lules de càrrega utilitzen una configuració de "Pont de Wheatstone" de pont complet (full bridge), utilitzen 4 galgues per obtenir una major sensibilitat i compensació de temperatura, ja que dues d'aquestes galgues estan en tensió i les altres dues en compensació. També hi ha dues configuracions més la de quart de pont (quarter bridge) i mig pont (half bridge).

Per tenir un correcte funcionament és necessari no sobrepassar el límit màxim d'esforç que pot suportar, ja que entraria en una deformació permanent i la galga extensiomètrica no tornaria a la seva posició normal després de la força aplicada. La informació del màxim esforç que suporta cada cèl·lula de càrrega ve definida en les taules de característiques que proporciona cada fabricant.

La cèl·lula de càrrega instal·lada en el banc d'assaig és una "Cèl·lula de càrrega a flexió" amb "Fuelle". Aquesta incorpora galgues extensomètriques que treballen a flexió en voladís, això significa que en un dels seus extrems té els forats per a la seva instal·lació fixa, i en l'extrem oposat incorpora un accessori per suportar la càrrega a mesurar, en aquest cas una barra.

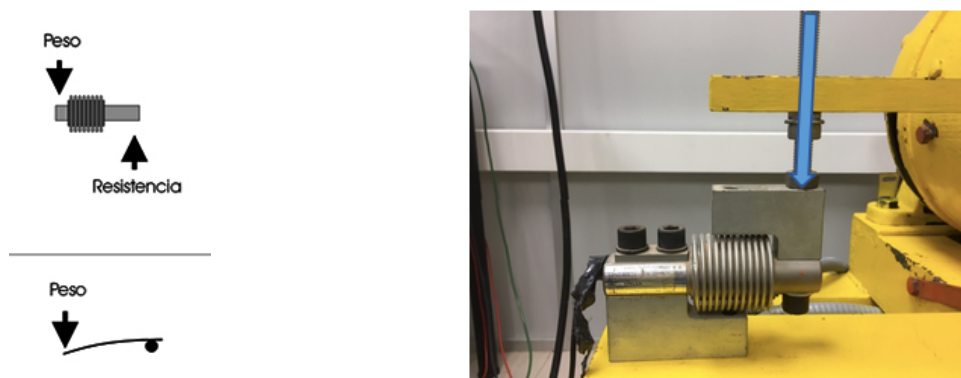


Fig. 12 Actuació de forces en la cèl·lula de càrrega i pes aplicat en la cèl·lula de càrrega utilitzada

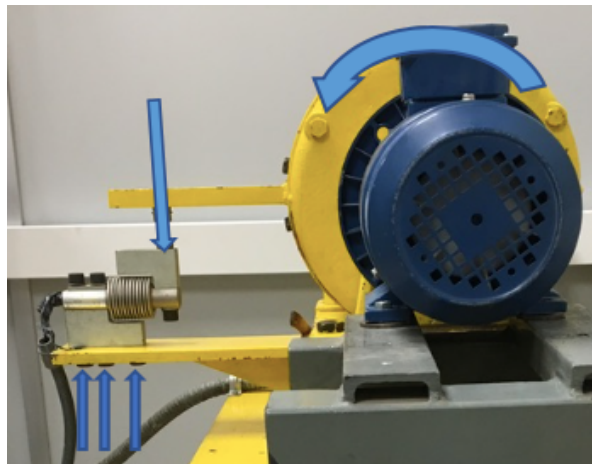


Fig. 13 Forces que actuen en la mesura del parell

Aquest transductor a d'anar connectat a la *DS1104 Controller Board*, en una de les seves entrades analògiques (A/D converter), on el rang d'entrada de tensió és de $\pm 10V$. A causa d'una sortida de senyals molt petites (mV) d'aquest tipus de cèl·lules, són molt susceptibles al soroll, i per tant és necessari incorporar un condicionador de senyal. El condicionador filtra i augmenta la resolució de la sortida del senyal per una lectura correcta. Per tant s'ha utilitzat un *TXDIN1600S* de Omega, gràcies aquest condicionador, genera 5Vdc per l'alimentació del circuit elèctric (Pont de Wheaston), també té diferents rangs de sortida tant de voltatge ($0-10V \pm 10V$) com d'intensitat ($0-20mA$, $4-20mA$) i incorpora un filtratge del senyal d'entrada. A través del software proporcionat per Omega es pot realitzar el calibratge de la cèl·lula de càrrega.



Fig. 14 TXDIN1600S de Omega

Avantatges

- Instal·lació senzilla.
- Baix cost.
- Bona precisió en les mesures.

Desavantatges

- Necessitats de suports per aplicar la càrrega en el punt desitjat.
- Mesura de petites càrregues (fins ≈ 2500 Kg).
- És necessari un condicionador de senyal, per tenir una correcta lectura en el controlador.

2.1.2.2 Dinamo tacométrica

Una dinamo tacométrica és un generador de tensió que converteix l'energia mecànica d'un eix, en un senyal elèctric que és proporcional a la velocitat angular (ω) de l'eix. Aquesta tensió es crea gràcies a una bobina situada dintre d'un camp magnètic creada pels dos imants. Aquest sensor és el més comú per mesures de velocitats de motors.



Fig. 15 Dinamo tacométrica

La dinamo tacométrica utilitzada és la *TDP 0,09 LT-2* de Hubner Berlin on el senyal de sortida és de 20V a 1000rpm. Aquesta sortida va connectada a una de les entrades analògiques (A/D converter) del controlador *DS1104 Controller Board*, com que aquestes entrades estan previstes per una tensió d'entrada de $\pm 10V$ és necessària la prèvia connexió a un divisor de tensió, ja que la velocitat nominal del motor és de 1500rpm.

El divisor de tensió utilitzar és el *RS: 729-6680 Differential probe (Low Voltage Model)*, on està previst de tres opcions; x100, x20 i x10.

Avantatges

- Bona precisió i estabilitat.
- Donen informació del sentit de gir.
- No cal processar el senyal V/RPM.
- Aplicació directa en la mesura de velocitat d'un motor.

Desavantatges

- Preu elevat.
- No pot determinar l'angle del rotor.
- A temperatures elevades pot causar mesures errònies.

2.1.3 Controladors

La plataforma docent utilitzada per poder realitzar el control i l'adquisició de senyals dels sensors incorporats en el banc és la ACE Kit 1104 de dSpace a través del Matlab/Simulink, on incorpora:

- Hardware
 - *DS1104 R&D Controller Board.*
- Software
 - Interfície en temps real (RTI).
 - ControlDesk.

2.1.3.1 Hardware

La *DS1104 R&D Controller Board* és una targeta estàndard que es pot connectar a una ranura PCI d'un ordinador. És un sistema de control en temps real que funciona a 250MHz. Utilitza dos panells de connectors d'interfícies específics que permeten accedir als senyals d'entrada i sortida fàcilment a través de connectors BNC i D-Sub. Aquests dos panells són:

- CP1104: és el panell que proporciona la fàcil connexió entre la targeta *DS1104 R&D* i els dispositius de mesura. Aquest panell disposa de 8 entrades analògiques (A/D, $\pm 10V$), 8 sortides analògiques (D/A, $\pm 10V$)

amb connectors BNC. També incorpora entrades i sortides digitals, entrades i sortides esclau PWM a partir de connectors d-Sub de 37-pins, dos connectors d'encoder incremental amb connector d-Sub de 15-pins i de dos connectors d-Sub de 9-pins el connector UART RS232 i el UART RS422/RS485.

- CLP1104: panell d'indicació d'estat dels senyals a partir d'una sèrie de LEDs.



Fig. 16 DS1104 R&D Controller Board

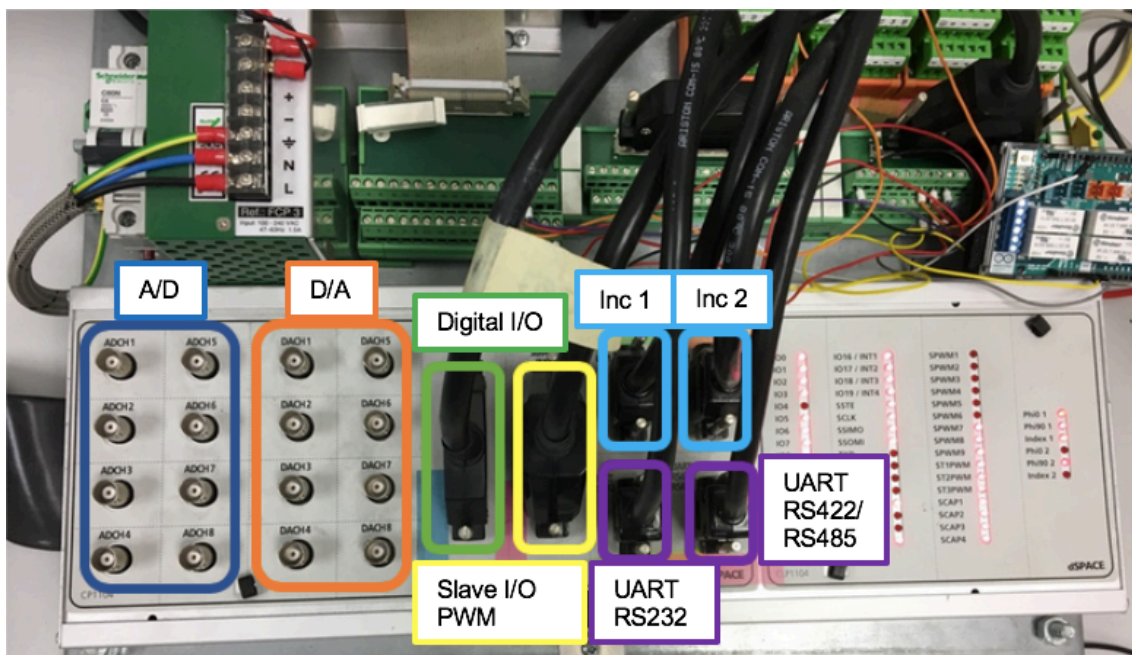


Fig. 17 Distribució d'entrades i sortides

2.1.3.2 Software

Per a facilitar la complexitat que pot crear alguns tipus de llenguatge de programació a l'hora de realitzar el control de parell s'han utilitzat diferents softwares.

La plataforma utilitzada *dSpace* incorpora en el seu software un programari de panell virtual que s'anomena *ControlDesk* que permet monitoritzar, emmagatzemar i analitzar en temps real els senyals rebuts a través dels panells instal·lats. S'ha utilitzat aquest software com a panell per visualitzar i modificar els diferents paràmetres creats en el model de control en *Simulink* per tal de poder realitzar les proves d'assaig requerides.

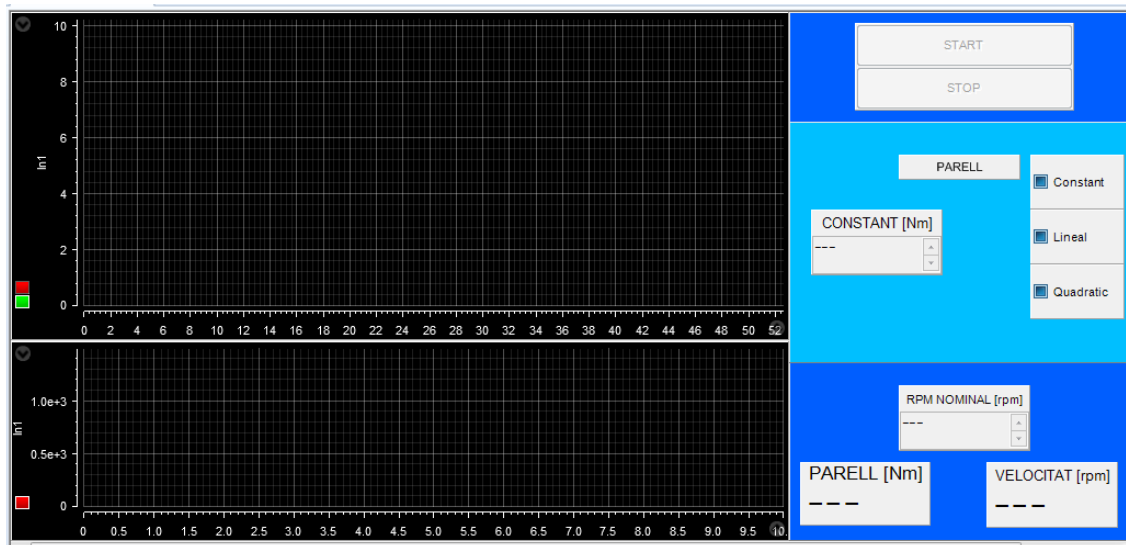


Fig. 18 Pantalla del ControlDesk

El codi de programació s'ha creat a través del software *Matlab* que proporciona una plataforma comuna per a la interfície de diferents hardwards, com és en aquest cas, el de *dSpace*. Aquest té l'opció de programar gràficament a través de *Simulink*, gràcies a la *Real Time Interface (RTI, de dSpace)* que proporciona una biblioteca de blocs pel tractament dels senyals d'entrades i sortides del panell CP1104. Una vegada creat el model a través de *Simulink*, es crea el codi C del model, es compila i s'uneix al compilador Power PC, on es descarrega al *DS1104* i el model creat comença a executar-se en la placa *dSpace*.

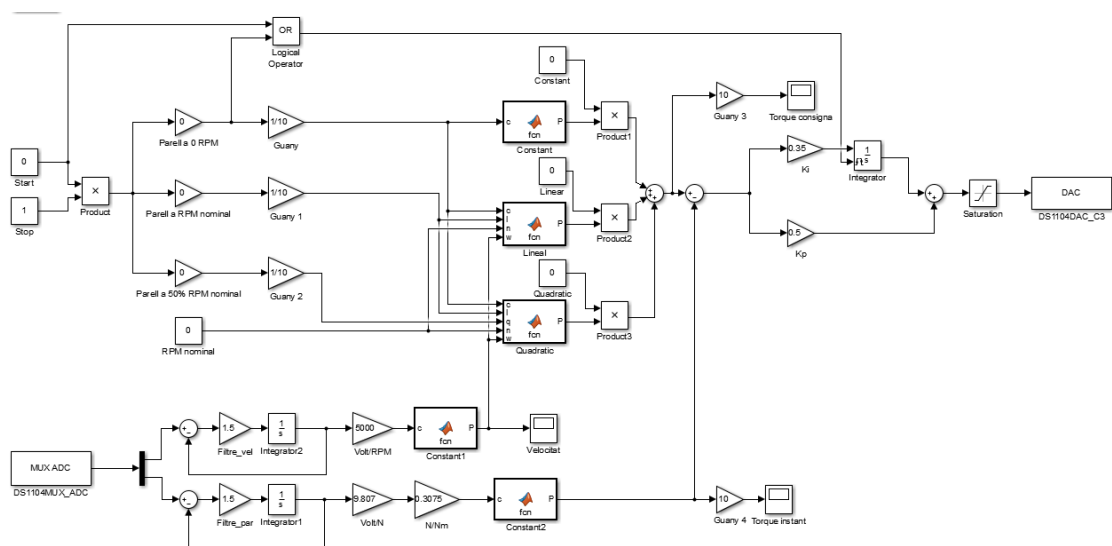


Fig. 19 Programació a partir del Simulink

Avantatges

- Baix cost.
- Molt versàtil.

Desavantatges

- Dimensions molt grans.
- Instal·lació en un lloc fix, això causa dificultat a l'hora del transport.

2.1.4 Convertidores

Per poder controlar el parell d'un motor de CC és necessari un controlador. S'ha utilitzat un convertidor també anomenat rectificador que transforma un senyal d'entrada de CA a un senyal de sortida de CC. El motor de CC a controlar actuarà com a fre per a un altre motor és per això que actuarà com a generador, per tant, és necessari que el controlador sigui capaç de treballar en els quatre quadrants d'un motor. És important tenir en compte que els quadrants estan formats per l'eix d'abscisses que representa el parell motor d'igual manera el corrent de l'induït, i l'eix d'ordenades que representa la velocitat del motor també la f.c.e.m i tensions del motor. Els quadrants són els següents:

- Primer quadrant: la velocitat i el parell motor són positius. Això significa que hi ha una transformació d'energia elèctrica en energia mecànica, per tant, la d'un motor.

- Segon quadrant: la velocitat és positiva i el parell és negatiu, per tant el motor actua com a generador elèctric això significa que està frenant.
- Tercer quadrant: la velocitat i el parell són negatius, el motor està treballant en un sentit invers.
- Quart quadrant: la velocitat és negativa i el parell és positiu, en aquest cas també actua com a generador i està frenant.

El rectificador utilitzat és el *ER-PLX20* de *Eurotherm*, és un convertidor molt versàtil, ja que al poder treballar en els quatre quadrants és capaç de retornar el corrent a la xarxa en el cas que el motor actues com a generador. El pont de tiristors trifàsic és un rectificador de fase controlada, que subministra alimentació a l'induït del motor. També té un control independent del camp d'excitació.



Fig. 20 Variador ER-PLX20, Eurotherm

A través dels paràmetres que es poden programar per part de l'usuari faciliten el control del moviment desitjat, a partir de l'entrada analògica de fixació de corrent de l'induït, es pot controlar la demanda de corrent necessària del motor controlada per l'usuari ignorant el circuit de velocitat, així al realitzar el control de parell controles directament el corrent sense la necessitat de què el motor estigui donant voltes.

Avantatges

- Rectificador versàtil.
- Capaç de treballar en els quatre quadrants.
- Control independent del camp d'excitació.
- Control de corrent de l'induït ignorant el circuit de velocitat.

Desavantatges

- Alt cost.
- Grans dimensions.

2.2 Muntatge

En aquest apartat s'explica els passos a seguir A causa de l'espai on es realitzen els assajos i al ser un banc amb components reutilitzant aquests no estan incorporats permanentment en un lloc fix, això causa que tots els components que conformen el banc normalment estan desconnectats, per tant és necessari seguir el procediment de muntatge.

La bancada està situada al *Laboratori d'accionaments elèctrics (057) a l'aula 058*. En la documentació annexada es troba l'esquema elèctric d'aquest muntatge.

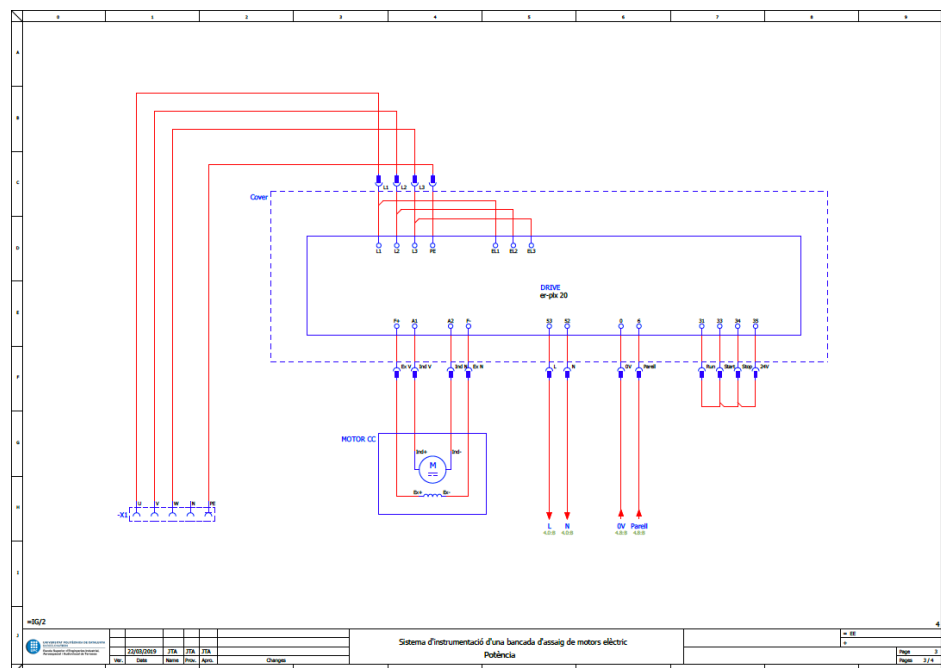


Fig. 21 Esquema elèctric de la part de potència

1. Connectar un cable elèctric de 4 conductors de la línia de xarxa del laboratori a l'entrada del rectificador, les característiques d'aquest cable han de ser: en un extrem endoll de tipus clavilla aeri trifàsic i en l'altre connectors mascles de tipus banana.



Fig. 22 Endoll d'alimentació trifàsic del laboratori



Fig. 23 Cable per connexió entre la xarxa d'alimentació i el convertidor

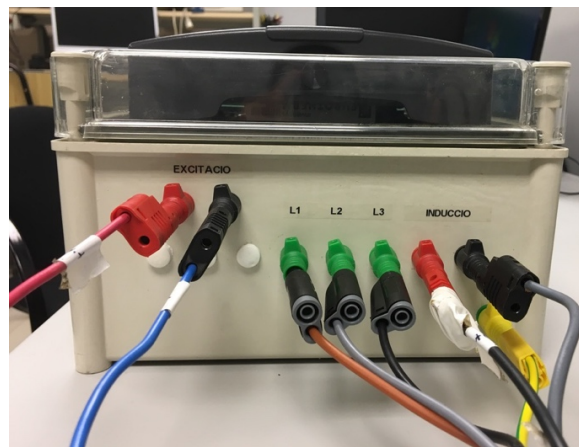


Fig. 24 Connexió de la part de potència del convertidor

2. Connectar els cables d'excitació i inducció del motor de CC al rectificador. Aquests connectors són de tipus banana, per fer una correcta connexió els cables del motor estan marcats amb cinta:

- Ex+: connector vermell del rectificador amb etiqueta d'identificació excitació.
- Ex-: connector negre del rectificador amb etiqueta d'identificació excitació.
- Ind+: connector vermell del rectificador amb etiqueta d'identificació inducció.
- Ind-: connector negre del rectificador amb etiqueta d'identificació inducció.

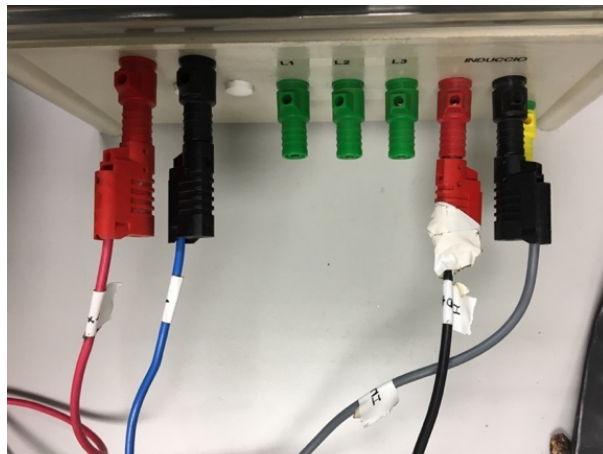


Fig. 25 Connexió del motor de CC al convertidor

3. Per l'alimentació del rectificador és necessari un cable elèctric amb connector femella IEC en un extrem i connector mascle schuko en l'altre extrem. El connector IEC es connecta al rectificador i el schuko a un endoll tipus schuko del laboratori.



Fig. 26 Connector IEC del variador

4. És molt important la connexió de L1, L2, L3 de la xarxa al rectificador en els pins L1, L2, L3 sigui el mateix ordre de fases que els pins del rectificador EL1, EL2, EL3. En el cas de no ser així, apareix una alarma al variador que no et permet un correcte funcionament (realitzar un pont en els rectificadors dels seus pertinents pins per no generar l'alarma).

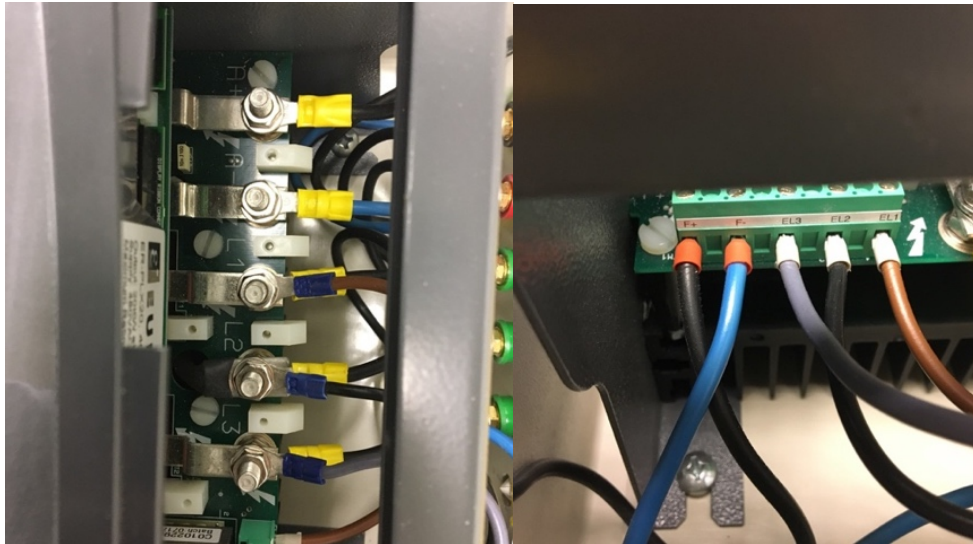


Fig. 27 Connexió del pont entre L1,L2,L3 i EL1,EL2,EL3

5. La connexió del control del rectificador, consta de quatre connectors bananes, les quals estan identificades com 24V, Stop, Start i Run. Poden existir tres casos de control:
- Posar en marxa el rectificador sense executar les interaccions amb el motor de CC: per realitzar aquesta connexió és necessari dos cables de tipus bananes, un anirà connectat del connector 24V al Stop i l'altre del 24V al Start.
 - Posar en marxa el rectificador i executar les interaccions amb el motor de CC: és necessari tres cables de tipus banana, un anirà connectat del connector 24V al Stop, l'altre del 24V al Start i per acabar del 24V al Run.
 - Aturar totes les interaccions del rectificador amb el motor de CC: per realitzar una aturada del banc d'assaig de manera manual, s'ha de treure els 24V del connector Stop, aquesta acció aturarà el banc de manera immediata.

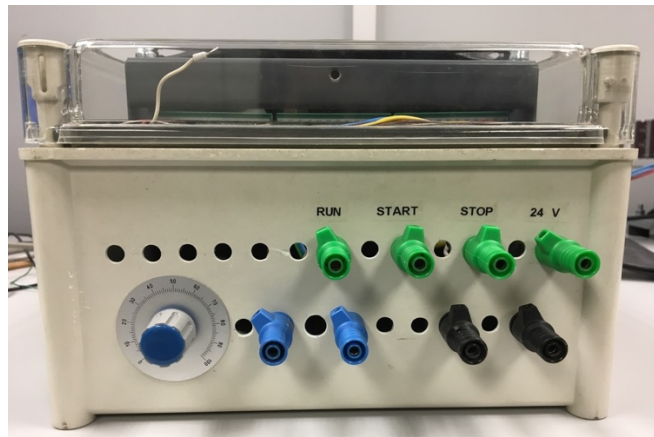


Fig. 28 Distribució dels connectors de control del convertidor

6. La connexió del sensor de velocitat, es fa partint dels dos cables que surten de la dinamo tacomètrica al divisor de tensió amb referència d'RS 729-6680, aquests cables es connectaran a la seva entrada. A partir d'un cable amb terminals BNC es connectarà la sortida del divisor de tensió a l'entrada ADCH 2 del panell de connexions CP1104. Pel correcte funcionament del divisor de tensió s'ha d'alimentar connectant-lo a un endoll tipus schuko del laboratori i posar el mode x100.



Fig. 29 Connexió del divisor de tensió

7. La connexió del sensor de parell, es fa mitjançant els quatre cables que surten de la cèl·lula de càrrega al condicionador de senyal *TXDIN1600S*:
 - El cable vermell al pin 8.
 - El cable negre al pin 11.
 - El cable verd al pin 7.
 - El cable blanc al pin 10.

Aquest condicionador de senyal va connectat a un transformador, on és necessari connectar-lo a un endoll tipus schuko del laboratori per la correcta alimentació del condicionador.

Finalment, amb un cable tipus BNC en un extrem i de dos cables amb terminals a l'altre cantó, es connecta:

- El cable vermell al pin 4.
- El cable negre al pin 5.
- El cable BNC a l'entrada ADCH 3 del panell de connexions CP1104.

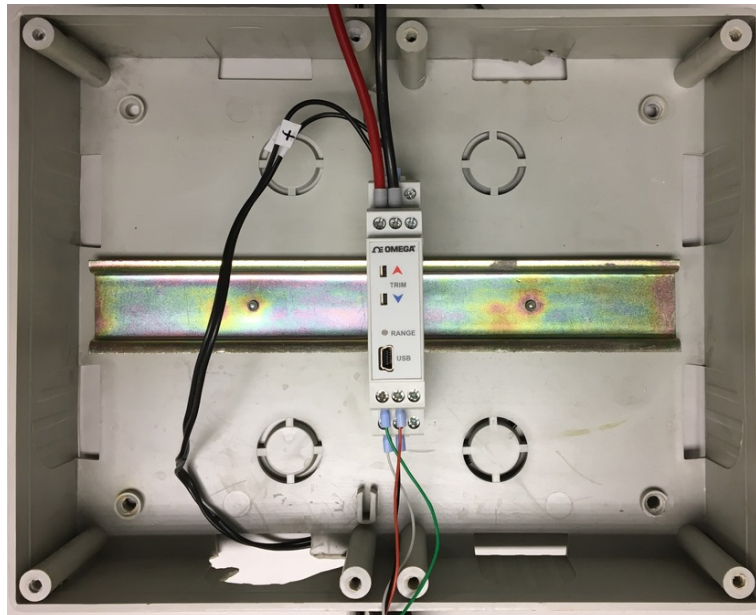


Fig. 30 Connexió del condicionador de senyal per cèl·lula de càrrega

8. Per finalitzar amb el muntatge, és necessari la connexió de la sortida analògica DACH 3 del panell de connexions CP1104 als dos terminals femelles del rectificador. Per realitzar aquesta connexió és necessari un cable tipus BCN en un extrem i de dos cables amb banana a l'altre costat.

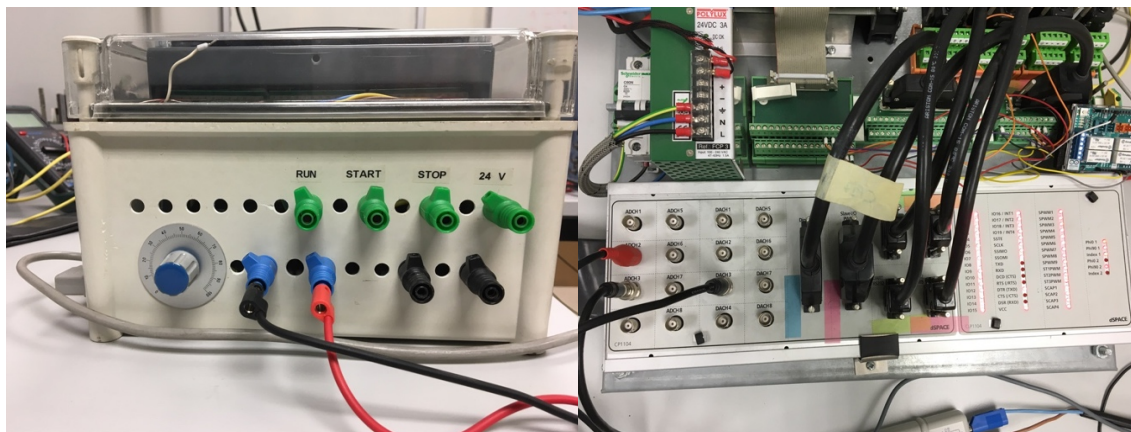


Fig. 31 Connexió de la sortida analògica del convertidor i connexions dels panells CP1104

2.3 Funcionament

En el següent apartat s'explica el procediment que s'ha de seguir per controlar i posar en marxa el banc d'assaig.

Amb el desenvolupament d'aquest projecte s'adjunta una carpeta anomenada "Projecte del sistema d'instrumentació d'una bancada d'assaig de motors elèctrics" on hi ha tots els arxius necessaris per a l'execució del banc.

Per començar, s'ha d'encendre l'ordinador del *Laboratori d'accionaments elèctrics (057)* a l'aula 058, on s'ha d'assegurar que aquest està connectat la *DS1104 R&D Controller Board* a través del connector PCI.



Fig. 32 Connector PCI

Una vegada encès, s'inicia el programa *Matlab* i es fa un adreçament a la carpeta adjuntada del projecte anomenada anteriorment, on sortiran tots els arxius de la carpeta a la "Current folder". A continuació s'obre l'arxiu anomenat "Controlador_de_parell_Simulink.slx".

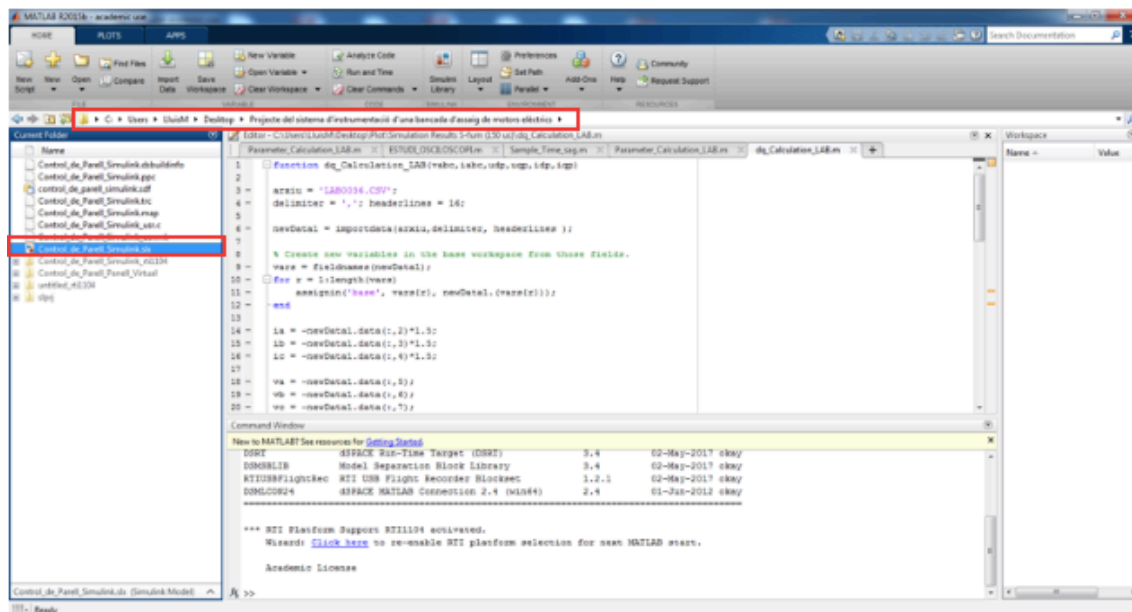


Fig. 33 Direccionament del Matlab

Una vegada obert, s'obrirà l'arxiu en l'entorn de *Simulink*, on s'ha de construir aquest model a la *DS1104 R&D Controller Board*. Un cop s'hagi compilat amb èxit es crea un nou arxiu amb extensió *.sdf*.

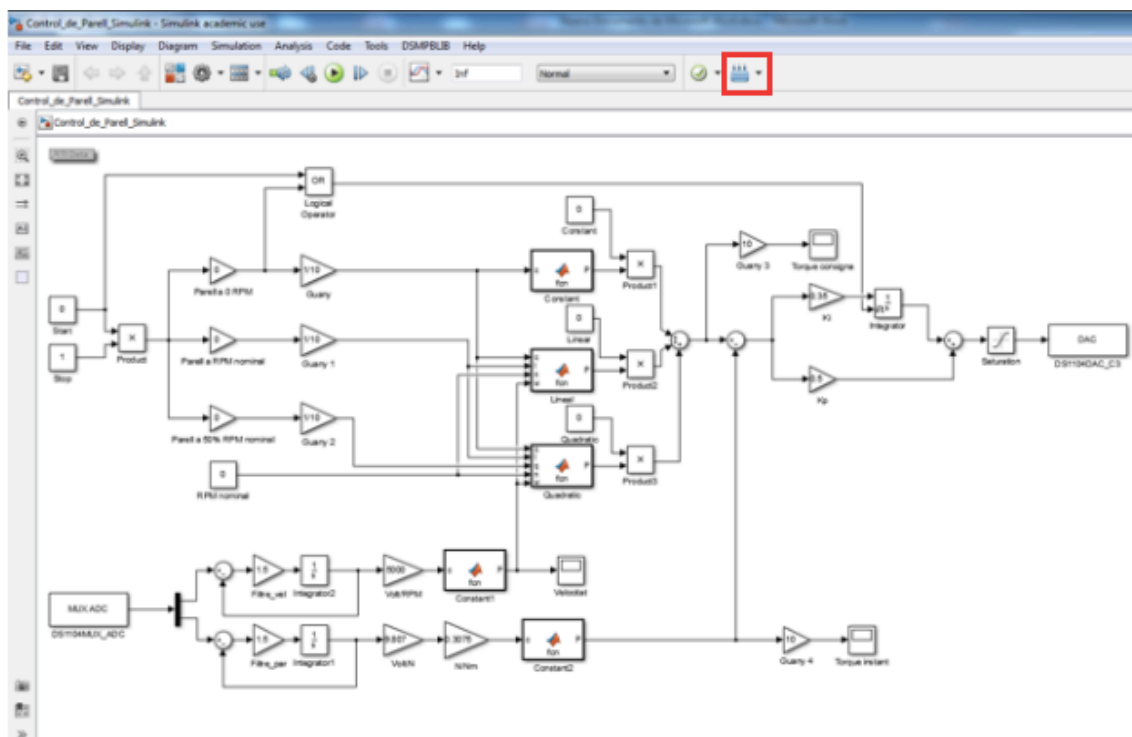


Fig. 34 Interfície Simulink, ubicació del compilador

El següent pas, és obrir el software *ControlDesk* que s'utilitza com a pantalla virtual per controlar la bancada, visualitzar les corbes tant de parell com de velocitat, parametritzar les característiques que es volen portar a terme en l'assaig i emmagatzemar els resultats. Per obrir el panell virtual creat s'ha de clicar a "Open Project + Experiment ...", seguidament s'obrirà una pestanya per seleccionar el projecte. En aquesta pestanya s'ha de fer un adreçament a la carpeta "Control_de_Parell_Panell_Virtual" que es troba en la carpeta adjuntada "Projecte del sistema d'instrumentació d'una bancada d'assaig de motors elèctrics" i obrir l'experiment.

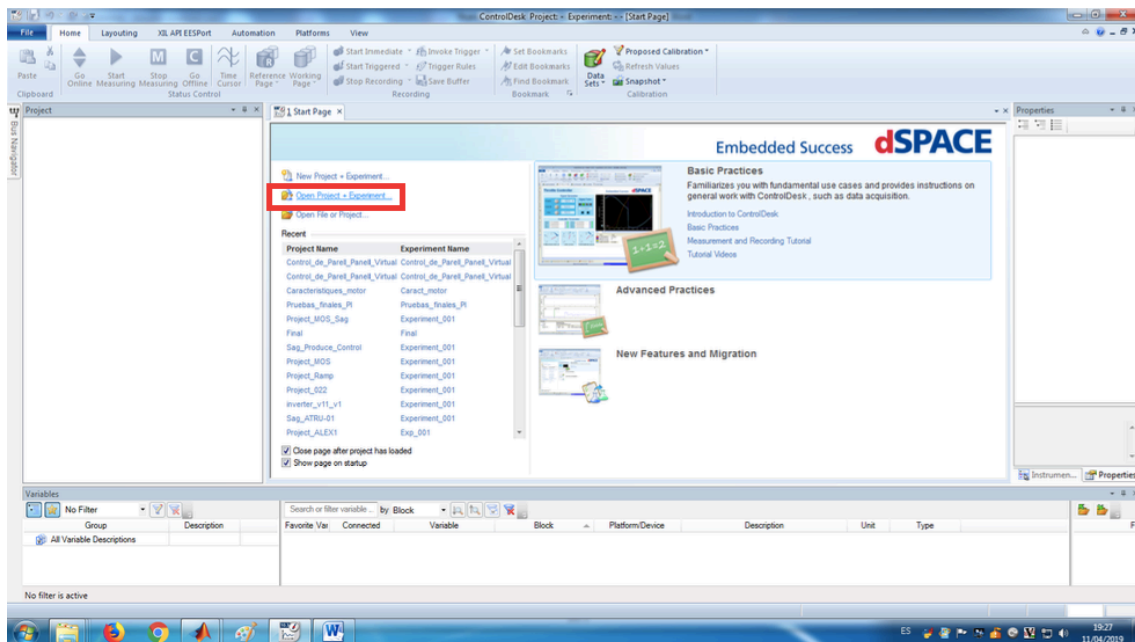


Fig. 35 Interfície ControlDesk, "Open project + Experiment .."

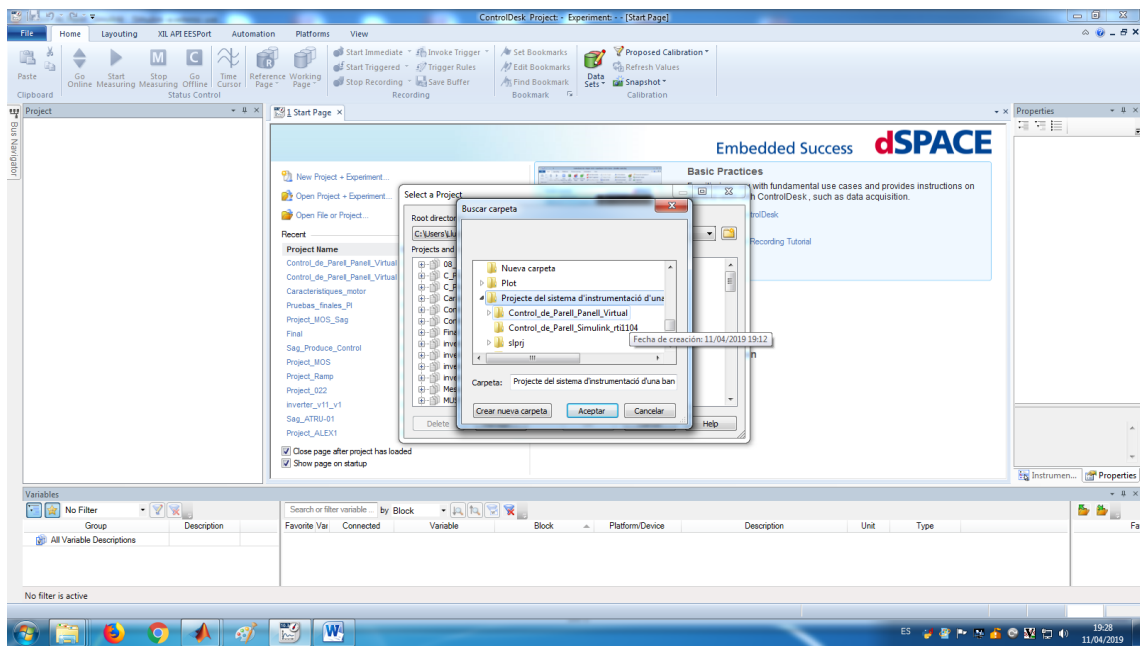


Fig. 36 Obrir l'experiment "Control_de_Parell_Panell_Virtual"

Per començar a controlar el banc d'assaig a partir del panell virtual és necessari clicar a "Go Online" i després a "Start Measuring".

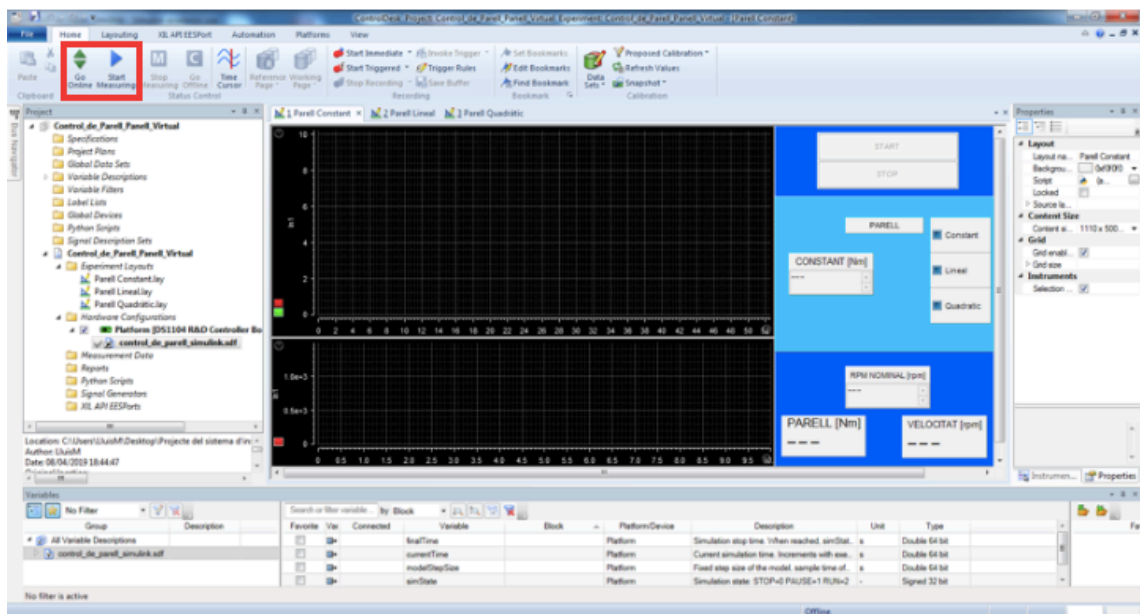


Fig. 37 Interfície ControlDesk, "Go online" "Start Measuring"

Una vegada s'han executat tots els passos anteriors, és l'hora de començar a controlar i realitzar els assajos a partir del panell virtual. El panell virtual desenvolupat consta de tres panells virtuals diferents:

- Control de parell constant.
- Control de parell lineal.
- Control de parell quadràtic.

Els tres panells tenen el mateix format on cadascun està dividit en cinc aspectes bàsics:

1. Posada en marxa Start/Stop.
2. Selecció de control desitjat.
3. Parametrització de l'assaig.
4. Velocitat nominal del motor acoblat.
5. Displays de parell i velocitat instantani.

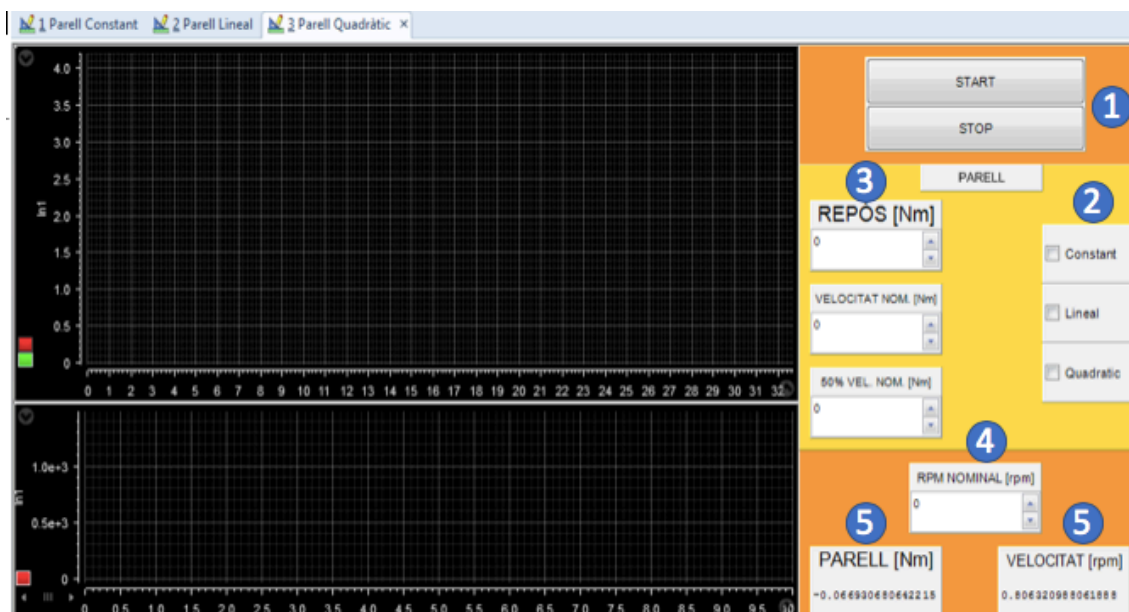


Fig. 38 Distribució dels paràmetres dels panells virtuals del ControlDesk

Per la realització d'un control de parell constant s'han de seguir els següents passos:

1. Seleccionar el tipus de control de parell que es vol aplicar, en aquest cas la casella de "Constant".
2. Omplir la casella d'entrada anomenada "RPM NOMINAL [rpm]" amb les RPM nominals del motor acoblat al motor de CC que actua com a fre.
3. Omplir la casella d'entrada "CONSTANT [Nm]" amb el parell constant que es vol realitzar l'assaig.

4. Clicar al botó “START” per començar l'assaig.

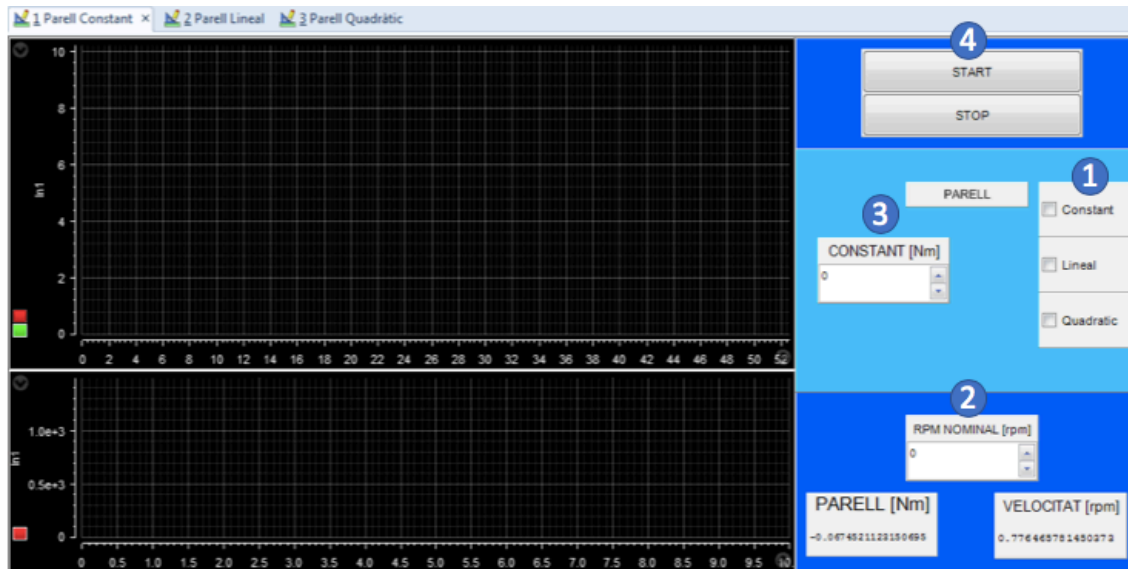


Fig. 39 Panell virtual del control de parell constant

La realització del control de parell lineal es realitza de la següent manera:

1. Seleccionar el tipus de control de parell que es vol aplicar, en aquest cas “Lineal”.
2. Omplir la casella d'entrada anomenada “RPM NOMINAL [rpm]” amb les RPM nominals del motor acoblat.
3. Omplir la casella d'entrada “REPÒS [Nm]” amb el parell desitjat quant el sistema està en repòs i la casella “VELOCITAT NOM. [Nm]” amb el parell desitjat a la velocitat nominal del motor.
4. Clicar al botó “START” per començar l'assaig.

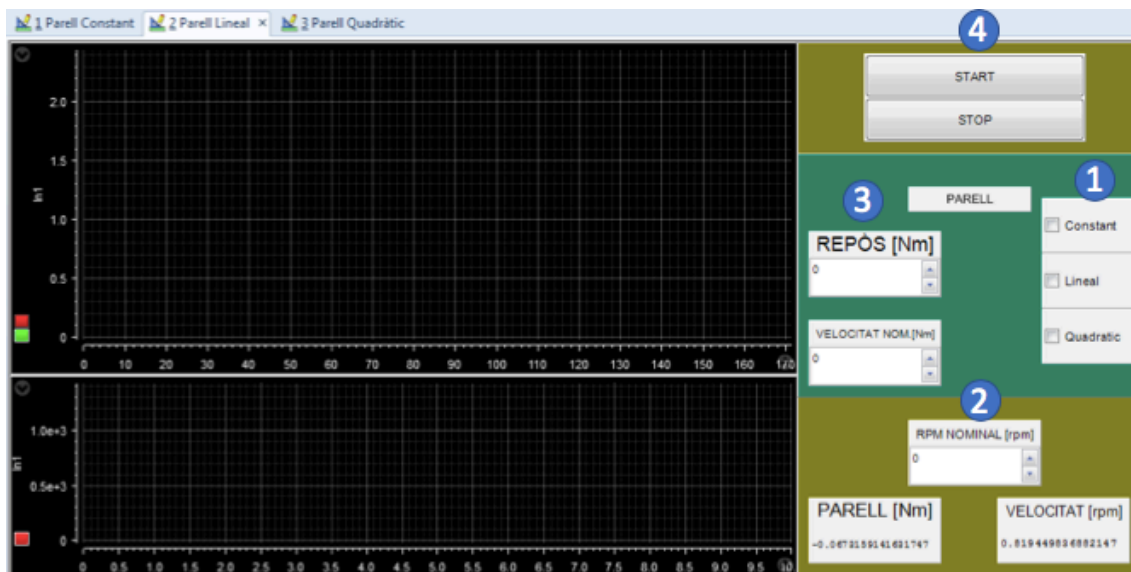


Fig. 40 Panell virtual del control de parell lineal

El procediment que s'ha de seguir pel control de parell quadràtic és el següent:

1. Seleccionar el tipus de control de parell que es vol aplicar, en aquest cas "Quadràtic".
2. Omplir la casella d'entrada anomenada "RPM NOMINAL [rpm]" amb les RPM nominals del motor acoblat.
3. Omplir la casella d'entrada "REPÒS [Nm]" amb el parell desitjat quant el sistema està en repòs, la casella "50% VEL. NOM.[Nm]" amb el parell quant el sistema està a la meitat de les seves rpm nominals i la casella "VELOCITAT NOM. [Nm]" amb el parell a la velocitat nominal del motor.
4. Clicar al botó "START" per començar l'assaig.

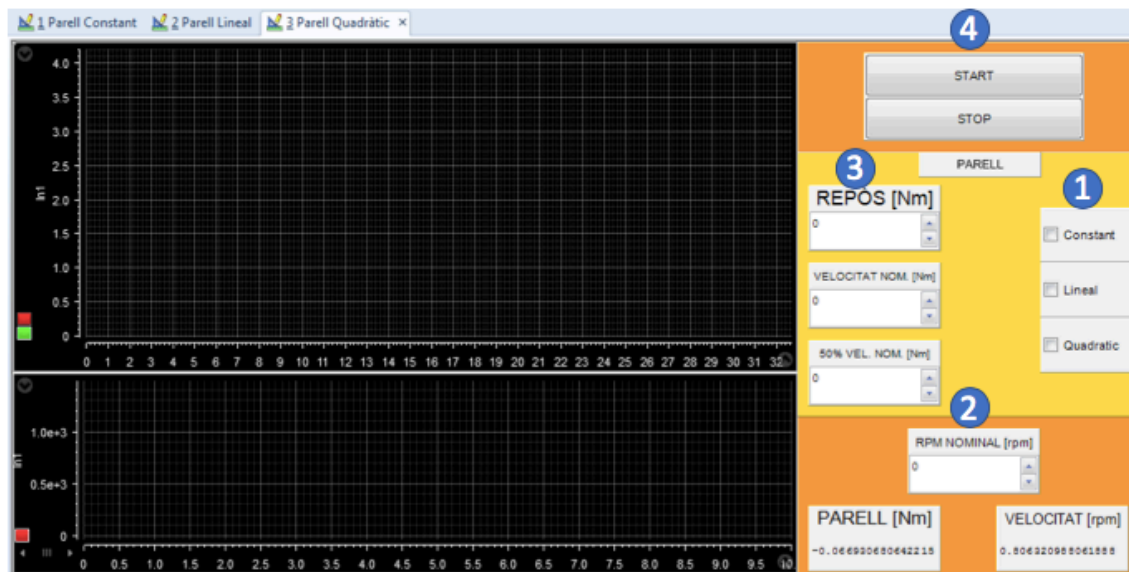


Fig. 41 Panell virtual del control de parell quadràtic

2.4 Adquisició de dades

Els senyals més utilitzats per l'adquisició de dades són els senyals analògics. Per reproduir aquests senyals per mitjans digitals és necessari convertir-les en format digital. Aquest processament es denomina conversió analògica-digital (A/D) i els dispositius corresponents, són els convertidors (A/D).

2.4.1 Freqüència de mostreig

En el període de conversió d'un senyal és molt important la freqüència de mostreig a escollir. Aquesta freqüència són les quantitats de mostres per segons que s'adquireixen d'un senyal continu. Per no tenir problemes de conversió és convenient aplicar el Teorema de Mostreig de Nyquist-Shannon. El teorema de Nyquist diu que la freqüència de mostreig ha de ser dues vegades superior a la freqüència màxima del senyal que s'ha de processar.

Equació 50 Teorema de mostreig de Nyquist-Shannon

$$f_s \geq 2f_{m\grave{a}x.}$$

En la pràctica, aquest teorema no es fa servir i s'utilitza la següent equació:

Equació 51 Teorema de mostreig en la pràctica

$$f_s \geq 10f_{m\grave{a}x.}$$

En el cas de no implementar aquest teorema és possible que aparegui el fenomen Aliàsing. Aquest fenomen succeeix quan la freqüència de mostreig és inferior a l'explicada anteriorment, en aquest cas es perd informació del senyal adquirida i és possible que no es pugui recuperar de forma precisa.

La freqüència màxima utilitzada és la que genera la dinamo tacomètrica a través del motor, ja que el motor gira a 1500rpm la freqüència màxima es de 25Hz. Aplicant el teorema de mostreig en la pràctica la freqüència de mostreig és la següent:

Equació 52 Freqüència de mostreig en la pràctica

$$f_s \geq 250Hz$$

Ja que el *Sample rate* en el software desenvolupat s'escriu en segons es necessari convertir la freqüència de mostreig.

Equació 53 Sample rate mínim per l'adquisició de les senyals

$$Sample\ rate \geq 0,004s$$

Finalment el *Sample rate* implementat en el software, ha estat de 0,001 segons.

2.4.2 Filtratge

Un filtre electrònic permet el pas de senyals elèctriques, a una determinada freqüència o rang de freqüències i impedeix el pas de les demes. Existeixen diferents tipus de filtres electrònics en aquest cas, és dona més importància als filtres analògics i digitals, ja que son els aplicats.

Els filtres analògics s'utilitzen en senyals analògiques, tant d'entrada com de sortida. Aquest tipus de filtres estan dividits en filtres passius i actius, aquesta classificació ve determinada pels components utilitzats per a la seva implementació.

Apareixen quatre filtres bàsics, aquests depenen de l'atenuació de la amplitud desitjada del senyal en funció de la freqüència. Els filtres són els següents:

- Filtre passa baixos: permet el pas del senyal a baixes freqüències, i bloqueja o elimina les altes. En la Fig. (42), es mostra la resposta en freqüència d'un filtre passa baixos ideal, on deixa passar totes les

freqüències que estiguin per sota de la freqüència de tall (f_c) i elimina les freqüències que estiguin per sobre d'aquesta.

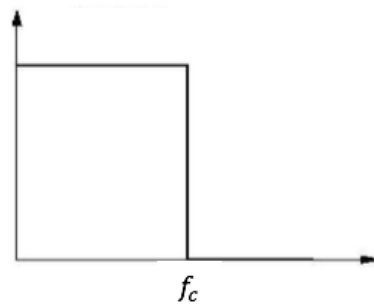


Fig. 42 Resposta en freqüència gràfica d'un filtre passa baixos

- Filtre passa alt: aquest filtre permet el pas dels senyals a altes freqüència i elimina les baixes freqüències. En la Fig. (43) es mostra com elimina el senyal a baixes freqüències i la deixa passar una vegada superada la freqüència de tall (f_c).

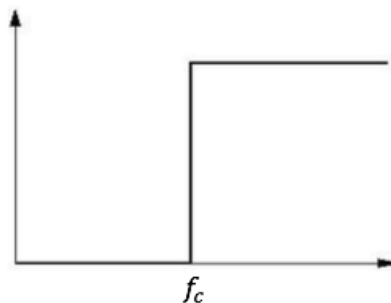


Fig. 43 Resposta en freqüència gràfica d'un filtre passa alt

- Filtre passa banda: permet el pas del senyal que està en el rang de freqüències (f_1) i (f_2) de la Fig. (44) i bloqueja les que estiguin fora d'aquest rang.

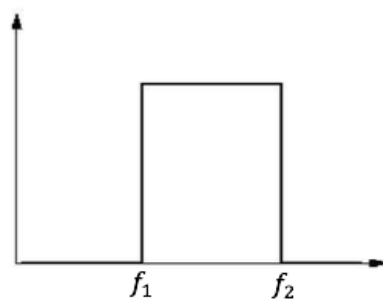


Fig. 44 Resposta en freqüència gràfica d'un filtre passa banda

- Filtre elimina banda: en aquest cas és el contrari que el filtre passa banda, ja que atenua el rang de freqüències (f_1) i (f_2) i permet el pas del senyal a la resta de freqüències que no es troben dintre d'aquest rang.

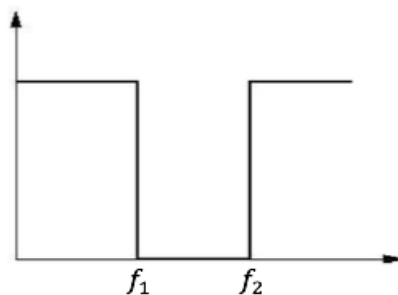
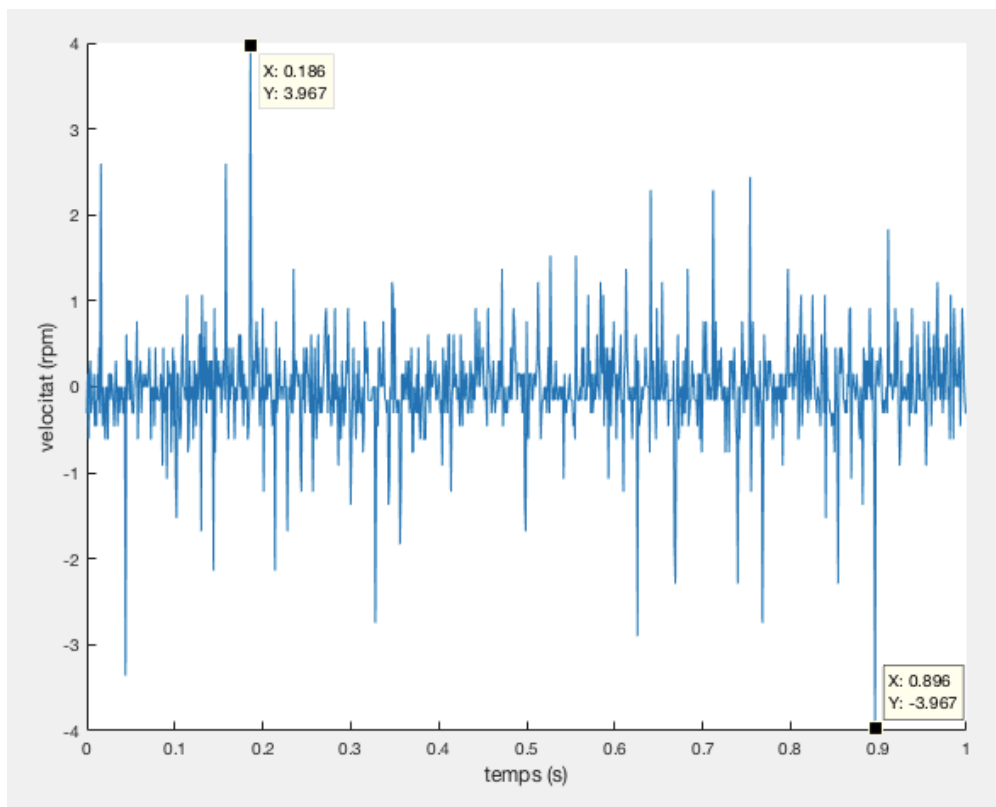


Fig. 45 Resposta en freqüència gràfica d'un filtre elimina banda

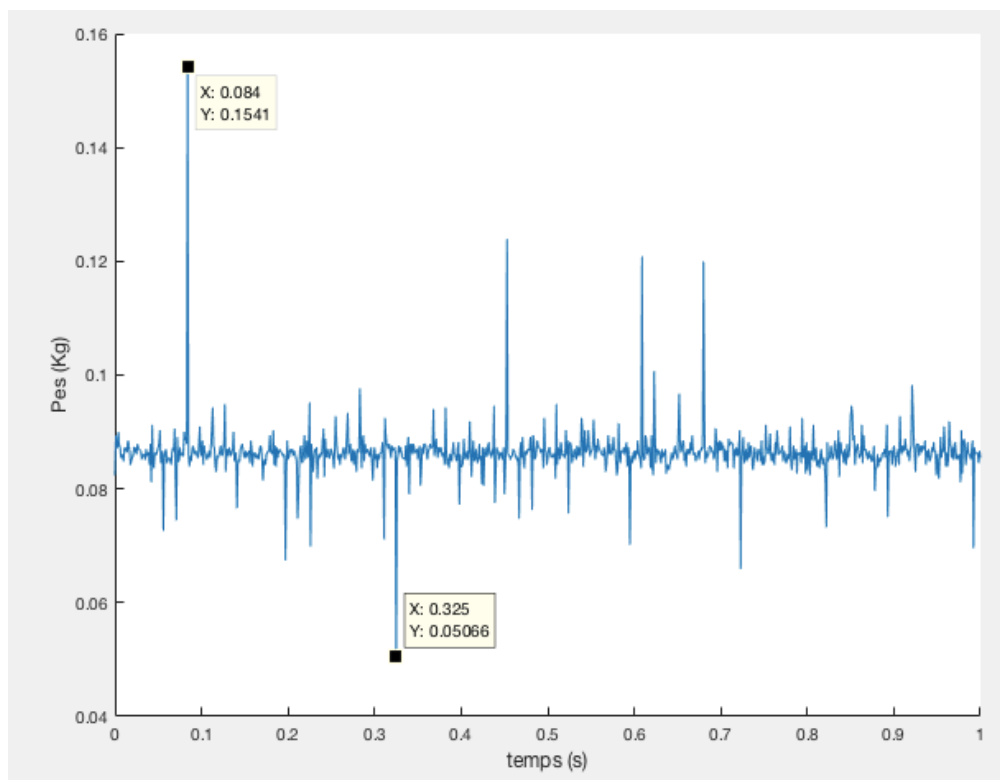
Els senyals analògics adquirits són senyals molt petits i sensibles a perturbacions i sorolls externs, com per exemple soroll procedent de la xarxa elèctrica (50Hz). Per això, és necessari la utilització d'un filtre passa baixos per poder eliminar totes les freqüències no desitjades que causen una distorsió del senyal adquirit.

A l'utilitzar el software *Matlab/Simulink* per la realització del control, és possible incorporar un filtre digital. El filtre digital actua d'igual manera que el filtre analògic, en aquest cas és necessari la conversió del senyal d'analògic a digital, això es realitza mitjançant una entrada analògica (A/D) del panell CP1104.

Les següents gràfiques mostren la resposta dels senyals analògics obtinguts sense un previ filtrat.



Gràfica 6 Senyal analògica adquirida de la dinamo tacomètrica sense filtre



Gràfica 7 Senyal analògica adquirida de la cèl·lula de càrrega sense filtre

Com es pot observar en les gràfiques anteriors els senyals obtinguts tenen una diferència d'error de $>1\%$. Aquest soroll afecta l'horitzó del control de parell, ja que fa que el sistema sigui estable i tingui una contínua oscil·lació en el punt de consigna.

Per evitar aquest problema és necessari la implementació d'un filtre actiu en aquest cas un integrador que actua com a filtre passa baixos. La següent imatge mostra l'esquema del filtre passa baixos:

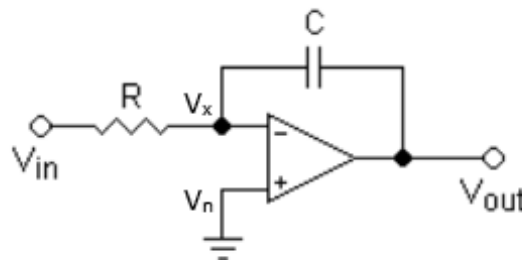


Fig. 46 Circuit operacional integral que actua com a filtre passa baixos

Per la implementació d'aquest circuit en el software desenvolupat és necessari aconseguir la funció de transferència, ja que descriu la relació entre el senyal de sortida i el d'entrada. Aquesta funció ve determinada per la següent equació:

Equació 54 Funció de transferència circuit integral

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)}$$

A partir del mètode de nodes desenvolupem el circuit de la Fig. (46):

Equació 55 Intensitats d'entrada i sortida al node Vx

$$\frac{V_{in} - V_x}{R} = C \frac{d(V_x - V_{out})}{dt}$$

Equació 56 Tensió en els nodes

$$V_x = V_n = 0$$

Equació 57 Desenvolupament de l'equació XX

$$\frac{V_{in}}{R} = -C \frac{dV_{out}}{dt}$$

Equació 58 Desenvolupament de l'equació XX

$$-\frac{1}{RC} \int V_{in} dt = V_{out}$$

Transformant l'equació (58) en el domini de Laplace:

Equació 59 Resultat de la funció de transferència del filtre passa baixos

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{RCs}$$

En la següent figura es pot observar, la implementació del filtre passa baixos en el software *Simulink*:

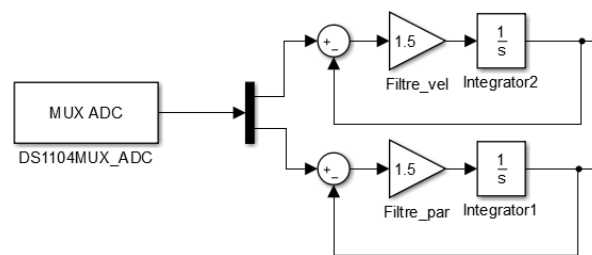
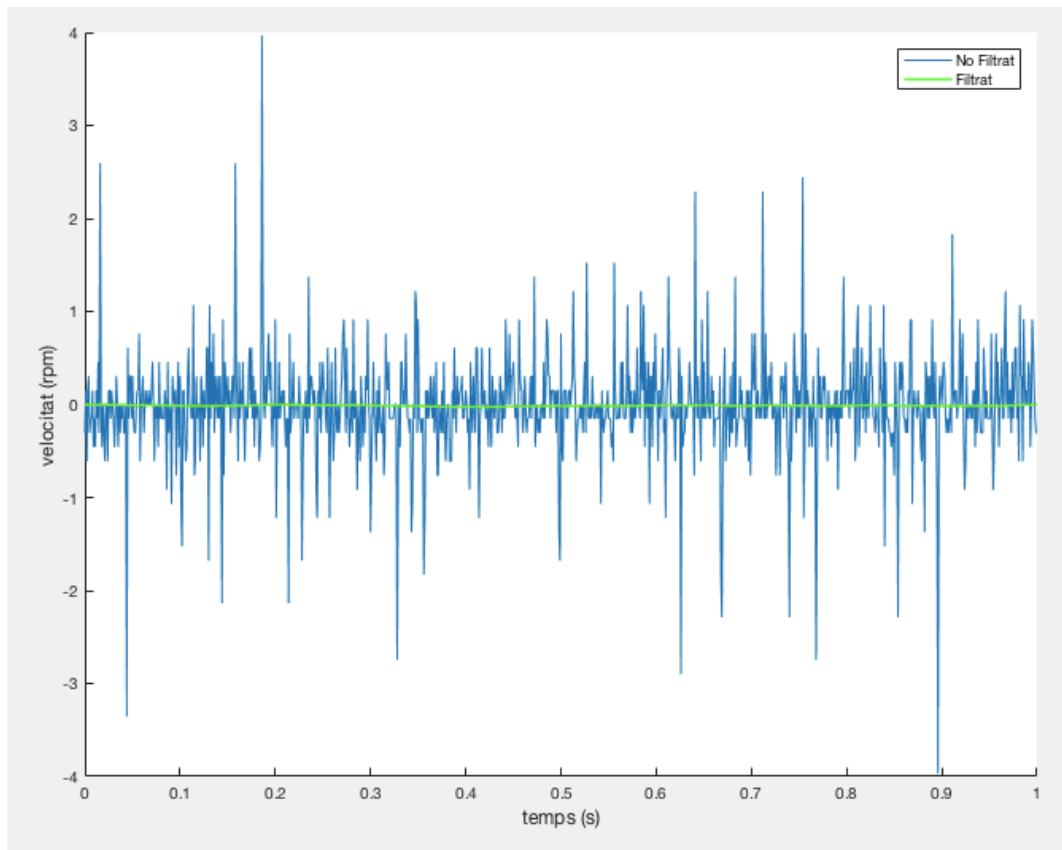
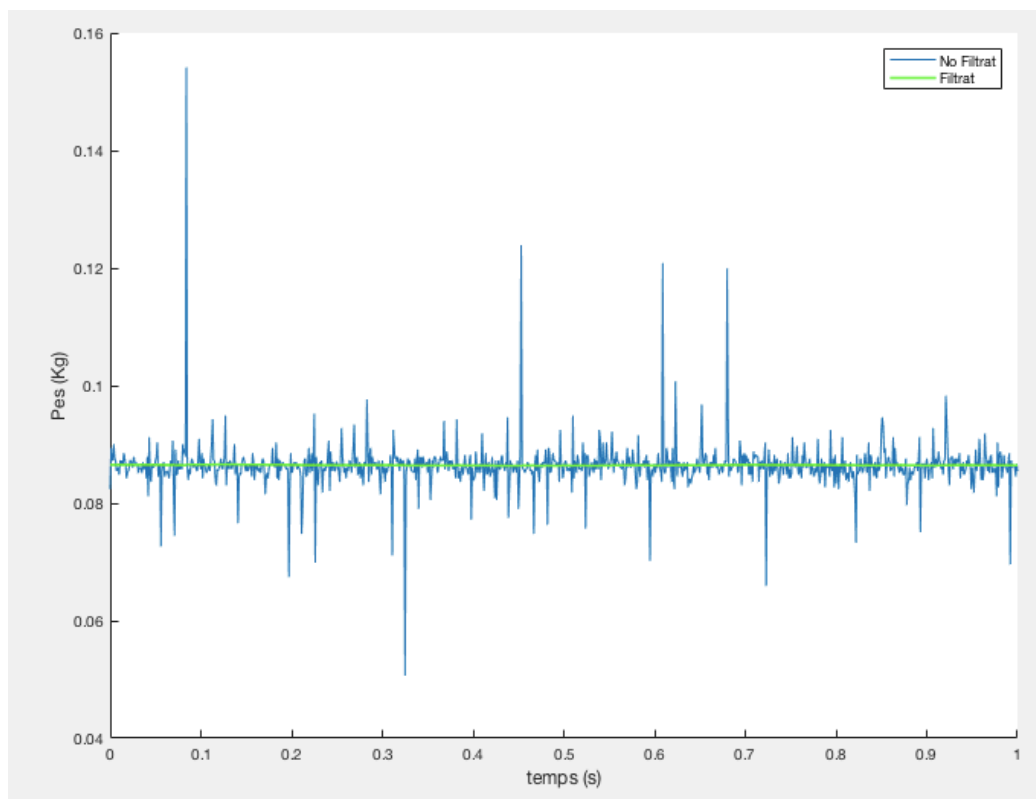


Fig. 47 Implementació del filtre passa baixos en el Simulink

Consisteix en un sistema realimentat amb un integrador, el guany escollit pels dos senyals tant la de velocitat com la de parell és de 1,5. Aquest valor a estat escollit de manera experiment observant l'estabilitat i rapidesa del sistema a l'hora de realitzar el control de parell.



Gràfica 8 Representació de les senyals adquirides a través de la dinamo tacomètrica amb filtre i sense filtre



Gràfica 9 Representació de les senyals adquirides a través de la cèl·lula de càrrega amb filtre i sense filtre

2.4.3 Calibratge

Per obtenir una correcta lectura dels sensors utilitzats és necessari la realització d'un calibratge, que consisteix en comparar els valors obtinguts dels sensors amb la mesura d'un patró de referència estàndard.

En el cas del calibratge de la dinamo tacomètrica s'han pres mesures a partir d'un tacòmetre calibrat prèviament. Els resultats han sigut els següents:

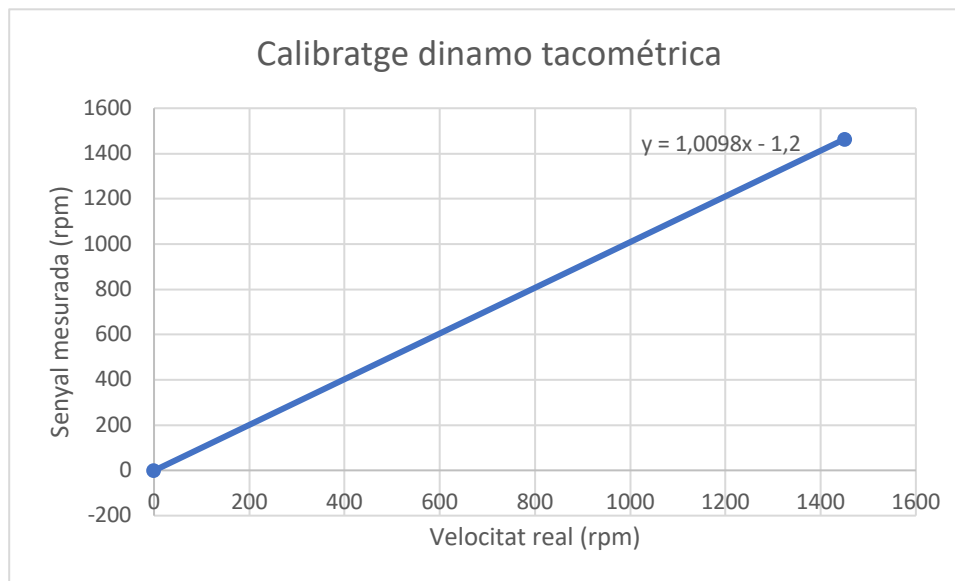
Velocitat tacòmetre (rpm)	Senyal llegida (rpm)
0	-1,2
1450	1463

Taula 4 Mesures adquirides per el calibratge de la dinamo tacomètrica

Al tenir un motor on no és possible regular la seva velocitat solament s'han pogut adquirir dues velocitats. Per obtenir una correcta lectura de la dinamo tacomètrica és necessari realitzar una corba lineal a partir de la taula XX. on l'equació de la recta serà el calibratge del sensor de velocitat.



Fig. 48 Mesura de la velocitat del motor a partir d'un tacòmetre



Gràfica 10 Calibratge dinamo tacomètrica

Una vegada obtinguda l'equació de la recta és necessari el seu desenvolupament per a la seva implementació en el software:

Equació 60 Equació calibratge del sensor de velocitat a implementar

$$x = \frac{y + 1,2}{1,0098}$$

En de la cèl·lula de càrrega s'han realitzat dos calibratges, el del condicionador *TXDIN1600S* d'Omega i un post calibratge d'adquisició de senyal.

Gràcies al software proporcionat per Omega dona l'opció d'escalar els senyals d'entrada en mV i donar un senyal de sortida desitjat segons les necessitats. Per la realització d'aquest calibratge s'han penjat diferents masses conegudes a la cèl·lula de càrrega per poder registrar els diferents valors al software d'Omega.

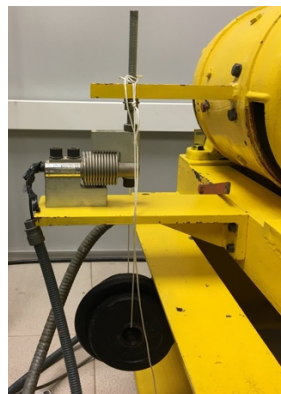


Fig. 49 Massa coneguda penjada de la cèl·lula de càrrega

Com es pot observar en la Fig. (50) s'han registrat sis mesures d'entrada que corresponen a les masses penjades conegudes de 0kg, 1kg, 2kg, 3kg, 4kg i 5kg. Una vegada registrades les mesures d'entrada cal definir el rang de senyal de sortida, en aquest cas el rang de sortida aplicat és de 0-5V, on la sortida serà igual a 1V/kg.

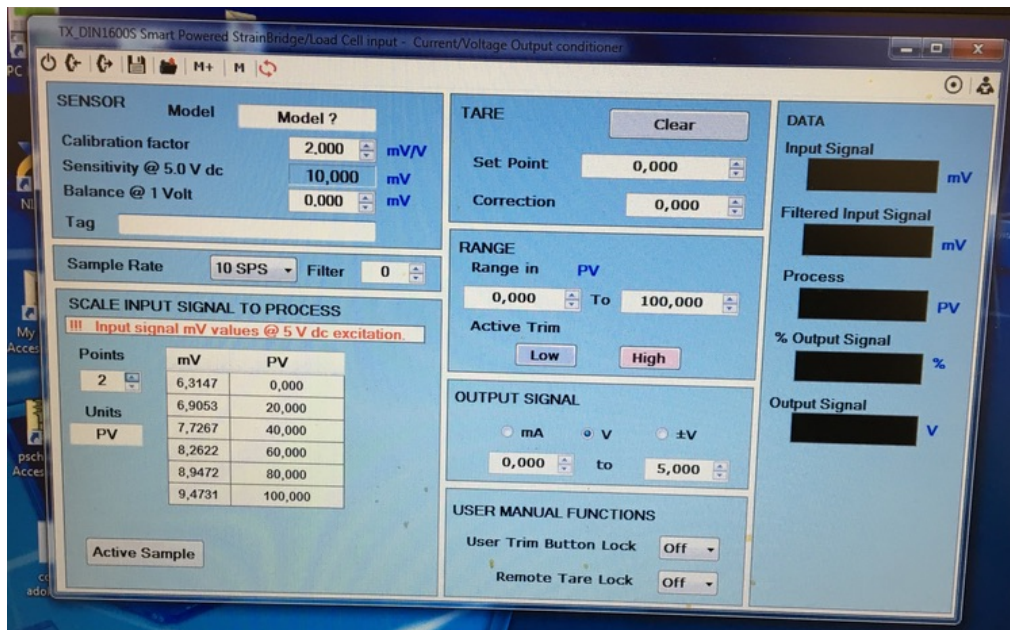


Fig. 50 Calibratge del condicionador de senyal *TXDIN1600S* d'Omega

Una vegada calibrat el condicionador de senyal, és necessari veure si a partir d'aquest calibratge és suficient per tenir una lectura correcta dels senyals en el controlador. Per tant, es capturen diferents senyals per diferents masses conegudes al controlador (ADCH).



Fig. 51 Massa coneguda aplicada a la cèl·lula de càrrega

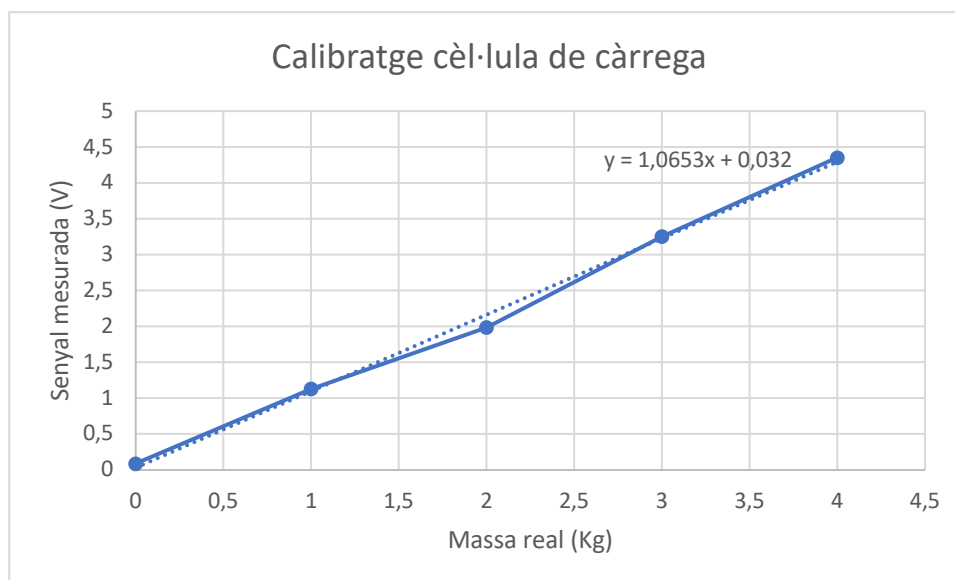
Aquests senyals es mostren a la següent taula:

Massa coneguda (kg)	Senyal llegida (V)
0	0,09
1	1,129
2	1,986
3	3,254
4	4,354

Taula 5 Mesures adquirides per el calibratge de la cèl·lula de càrrega

La conversió del senyal llegit de V a kg com ja s'ha comentat anteriorment en el calibratge del condicionador de senyal és de 1V/kg, per tant podem observar que amb el calibratge del condicionador no ha sigut suficient per obtenir una lectura correcta.

Per obtenir una lectura correcta de la força aplicada en la cèl·lula de càrrega es realitza una regressió lineal a partir de l'assaig realitzat en la Taula (5).



Gràfica 11 Calibratge cèl·lula de càrrega

Una vegada obtinguda l'equació de la recta de la regressió lineal es vol obtenir la massa real que s'aplica a la cèl·lula de càrrega, per tant es procedeix a desenvolupar l'equació per obtenir el valor desitjat i posteriorment poder incorporar-lo en el software desenvolupat.

Equació 61 Equació del calibratge del sensor de parell a implementar en el software

$$x = \frac{y - 0,032}{1,0653}$$

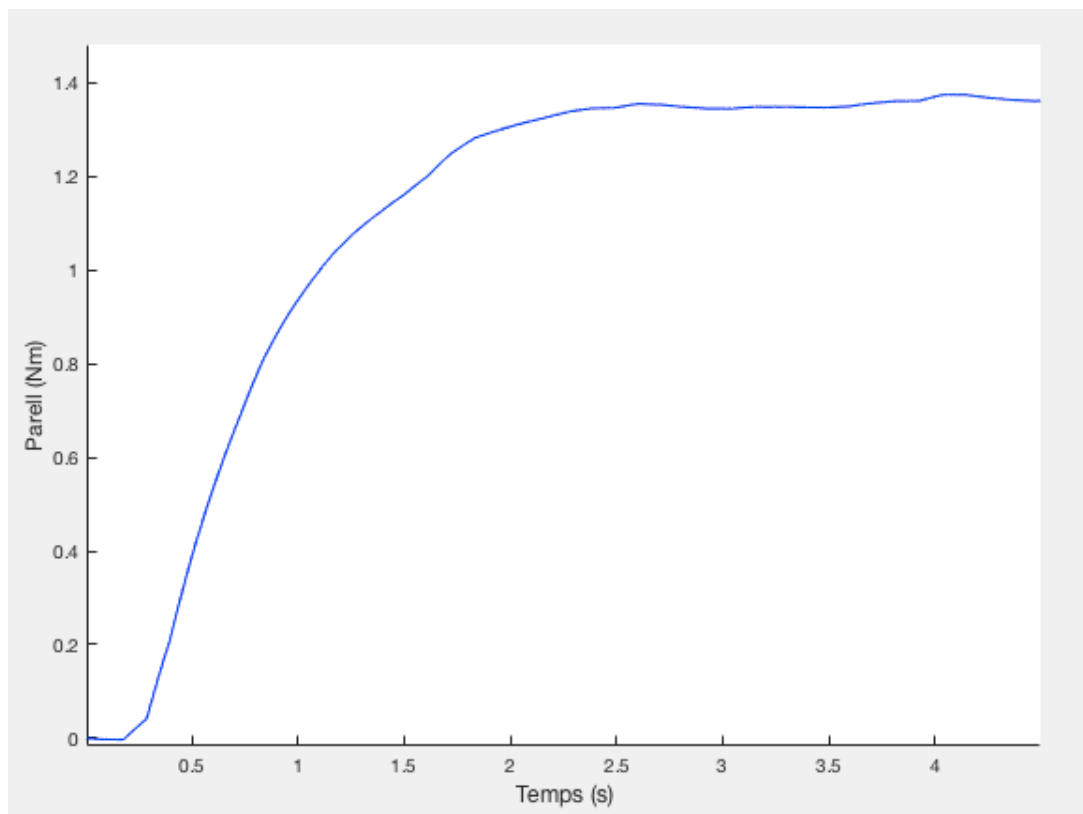
2.5 Ajust controlador

L'ajust dels paràmetres pel control d'un sistema és molt comú en processos industrials. En aquest cas aquests paràmetres s'han pogut definir a partir d'un model matemàtic d'una planta, mitjançant la realització de la simulació del sistema complint les especificacions en estat transitori i en estat estable en llaç tancat. El model matemàtic de la planta del sistema s'ha extret de forma experimental obtenint els paràmetres del motor, això pot crear que el model de la planta no s'aproximi del tot a la realitat. És per això que per comprovar aquests paràmetres es realitzen dos regles d'ajust de paràmetres experimentals.

2.5.1 Ziegler Nichols

El mètode de Ziegler-Nichols permet l'ajust dels paràmetres del controlador de forma empírica. Aquests valors intenten aconseguir un sobre pic màxim del 25% que és un valor acceptable per l'estabilitat i rapidesa dels sistemes.

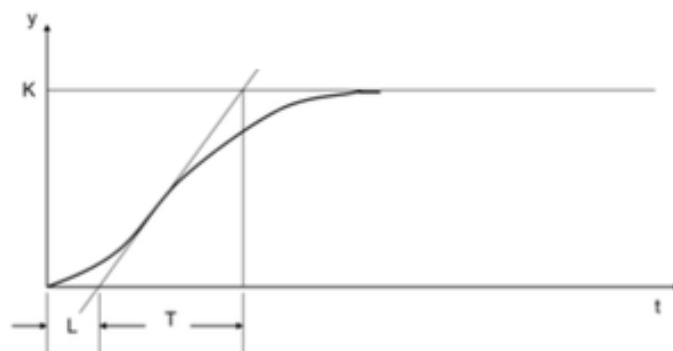
S'utilitza el primer mètode de Ziegler-Nichols, on es sintonitzen els paràmetres mitjançant un llaç obert del sistema. Aquest mètode consisteix a aplicar una entrada graó al sistema en llaç obert sense controlador i s'adquireix la seva resposta. En el cas de no contenir integradors ni pols dominants complexos conjugats la resposta del sistema serà en forma de S i es podrà aplicar aquest mètode.



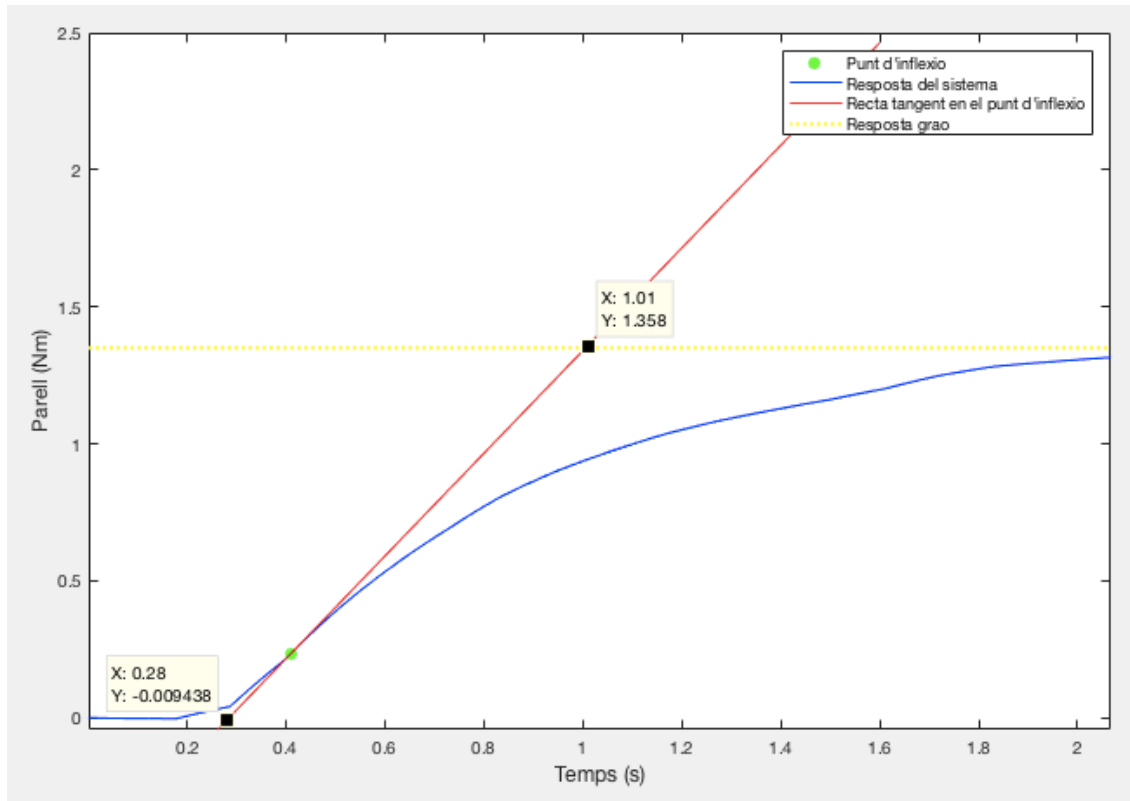
Gràfica 12 Resposta del sistema en llaç obert aplicant una entrada graó

Com es pot observar en la Gràfica (10) la resposta del sistema es en forma de S i per tant es pot utilitzar aquest mètode.

Aquesta corba es caracteritza per dos paràmetres: el temps de retard L i la constant de temps T . Per aconseguir aquests paràmetres es dibuixa una recta tangent en el punt d'inflexió de la resposta del sistema.

Fig. 52 Resposta del sistema determinant els paràmetres L i T

En la següent gràfica es mostra els valors d'aquests paràmetres a partir d'un programa realitzat amb *Matlab*:



Gràfica 13 Mètode de Ziegler-Nichols, determinació dels paràmetres L i T

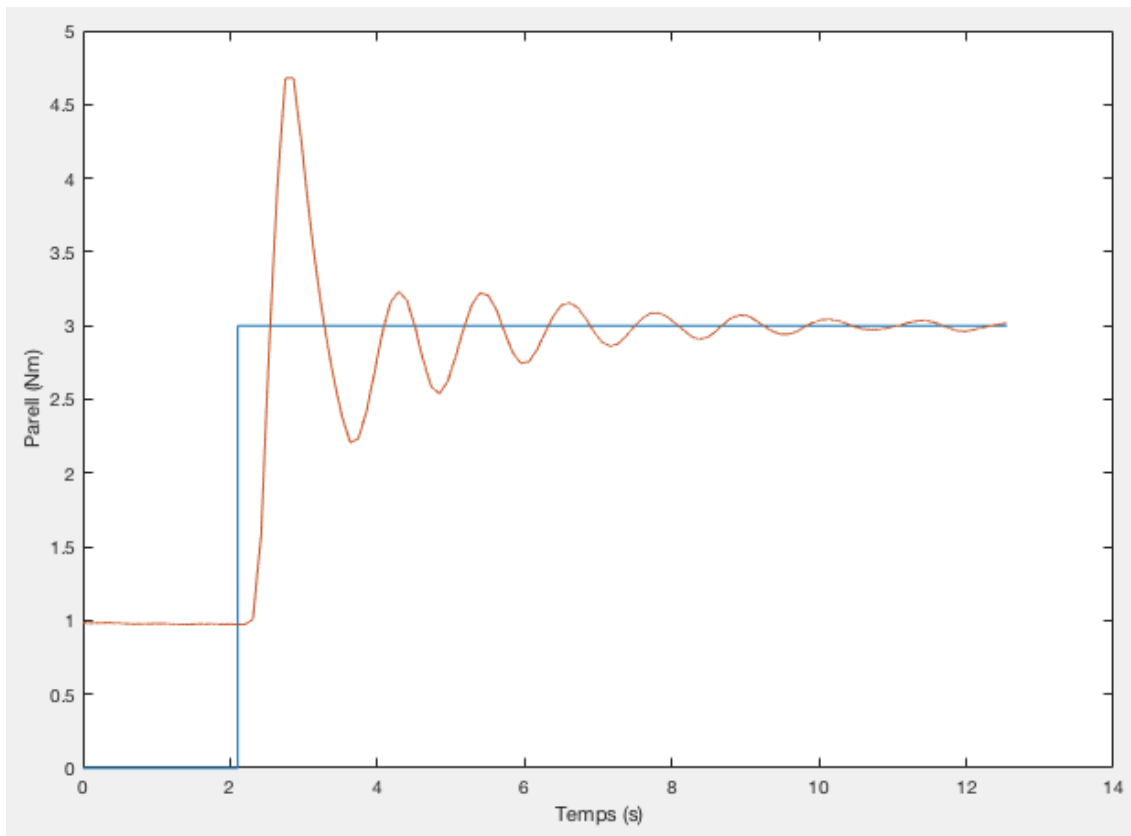
Els valors obtinguts són: $L=0,28$ i $T=0,73$.

Per obtenir els paràmetres PI del controlador a implementar és necessari utilitzar la taula de Ziegler-Nichols.

Controladors	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9 \cdot (T/L)$	$L/0,3$	0
PID	$1,2 \cdot (T/L)$	$2 \cdot L$	$0,5 \cdot L$

Taula 6 Paràmetres de Ziegler-Nichols mètode del llaç obert

Els paràmetres del controlador PI a partir del mètode en llaç obert de Ziegler-Nichols són: $K_p= 2,3464$ i $K_i=1,0714$.



Gràfica 14 Resposta del sistema aplicant els paràmetres de PI segons el mètode de Ziegler-Nichols

2.5.2 Mètode experimental de prova i error

Una vegada obtinguts els paràmetres del controlador PI a partir de diferents mètodes es realitza un ajust final a partir del mètode experimental de prova i error.

Aquest mètode consisteix a anar variant els paràmetres del controlador calculats a partir dels diferents mètodes utilitzats en aquest projecte fins a arribar a la resposta desitjada. Aquests paràmetres s'han variat tenint en compte la següent taula on mostra com afecta l'augment dels guany:

Resposta laç tancat	Temps de pujada	Sobre pic	Temps d'establiment	Error
K_p	Disminueix	Augmenta	Poc canvi	Disminueix
K_i	Disminueix	Augmenta	Augmenta	Elimina
K_d	Poc canvi	Disminueix	Disminueix	Poc canvi

Taula 7 Com afecta l'augment de les constants del controlador PID

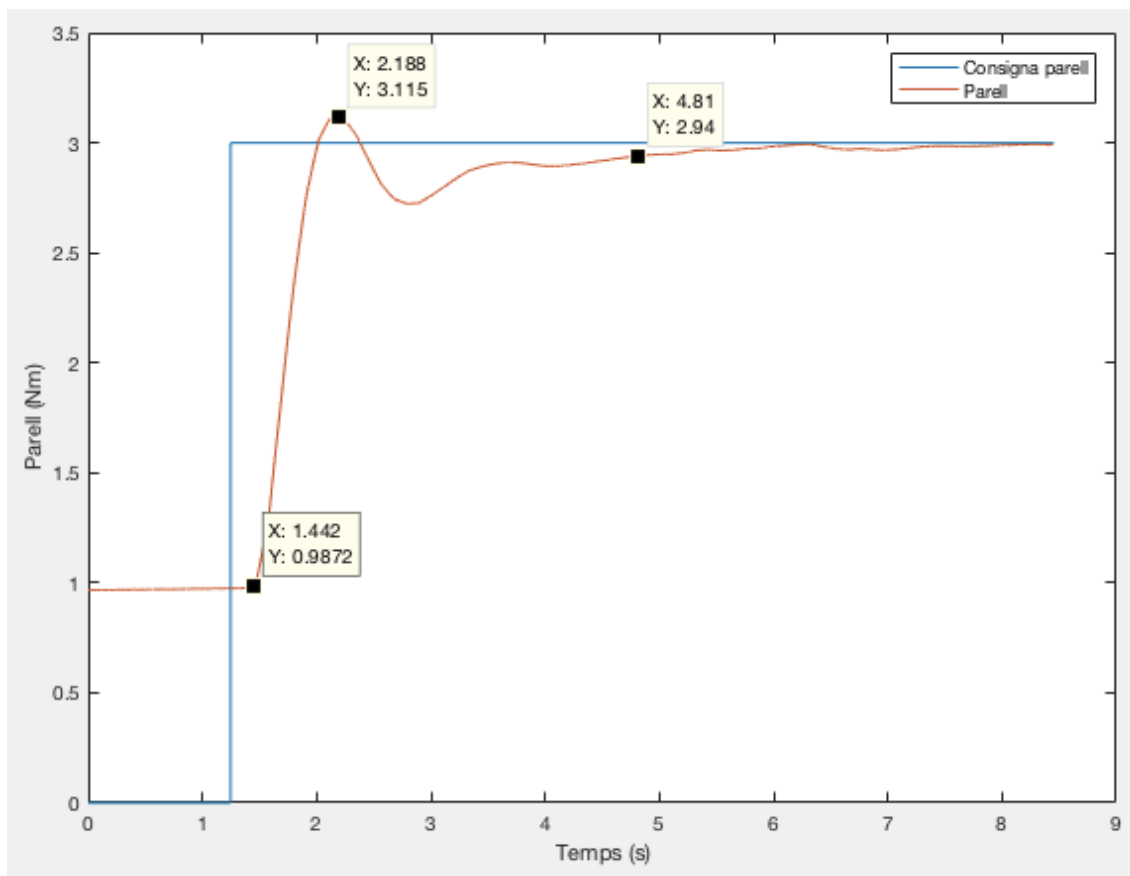
2.6 Resultats

En aquest apartat es mostren els resultats experimentals de les càrregues mecàniques desitjades a partir de la implementació del controlador dissenyat. Els paràmetres del controlador PI s'han extret a partir del mètode experimental de prova i error, ja que els valors dels paràmetres calculats a partir de la simulació teòrica i el mètode experimental de Zigler-Nichols, s'obtenien percentatges de sobrepic molt elevats i un temps d'estabilització molt elevat. Aquests mètodes han servit per tenir un mínim de coneixement dels valors dels paràmetres.

2.6.1 Parell constant

La resposta del sistema a parell constant es veu representada en la gràfica (15). Per aconseguir aquesta resposta s'aplica un graó de parell de més o menys un quart del parell nominal del motor de CC a la velocitat nominal del motor trifàsic acoblat. Aquest parell s'ha aplicat degut a la diferència de potència que té el motor trifàsic amb el motor de CC, ja que aplicant el parell nominal el motor trifàsic no es mouria.

En la gràfica (15) es pot observar les característiques de la corba de parell constant on s'obté un sobrepic de $M_p\%=3,8\%$ i un temps d'establiment d'uns $t_s=3s$, on la resposta en l'estabilització és pràcticament nul·la.

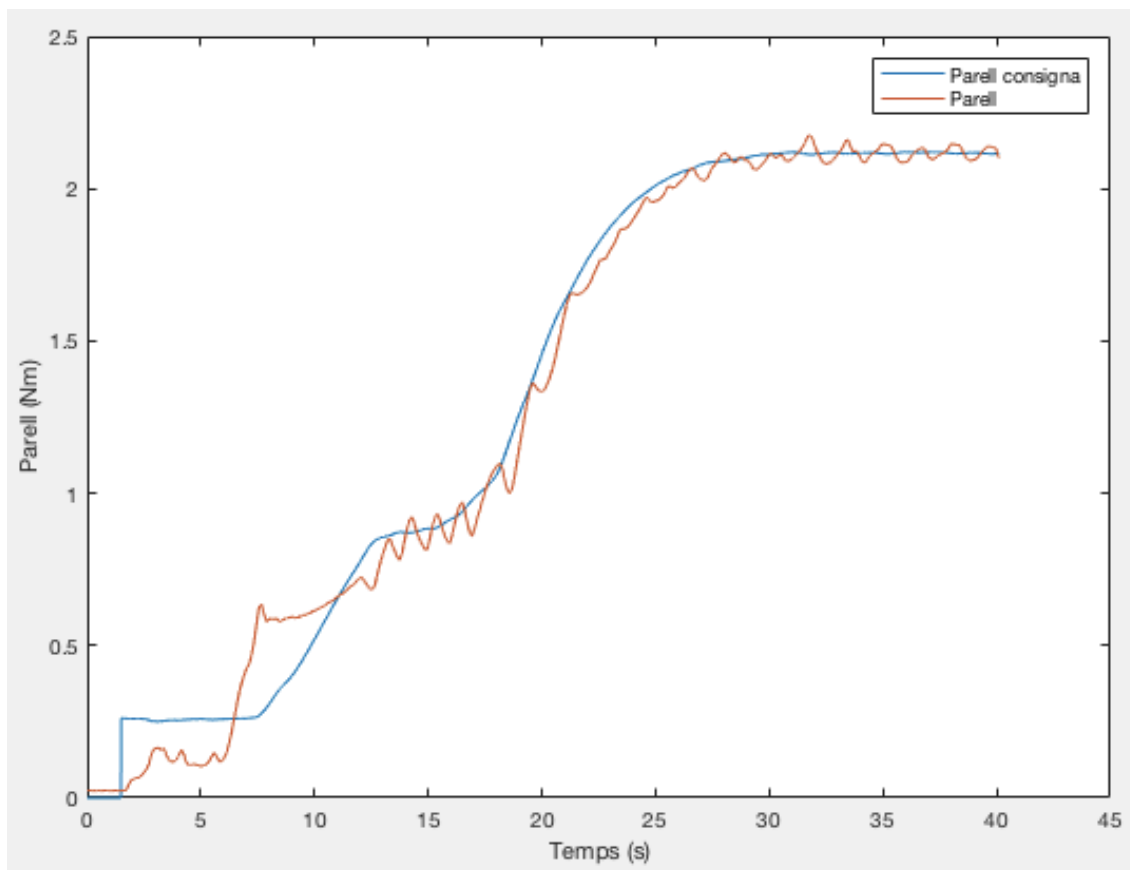


Gràfica 15 Resposta del sistema a parell constant

2.6.2 Parell lineal

Per la realització de les càrregues mecàniques següents s'aplica una consigna de velocitat lineal. A causa del funcionament del motor trifàsic on el seu funcionament és en repòs o nominal, l'aplicació d'una consigna de velocitat lineal és molt complicat de realitzar a partir de la font d'alimentació utilitzada.

La gràfica (16) mostra la resposta del sistema a parell lineal, com s'ha comentat anteriorment a baixes revolucions és complicat l'ajust del parell a causa de la diferència de potències entre motors i el funcionament del motor trifàsic. Una vegada el motor trifàsic va agafant inèrcia (entre el segon 13 i 30) la velocitat és més lineal i s'ajusta més el control de parell fins a arribar a un error pràcticament nul.

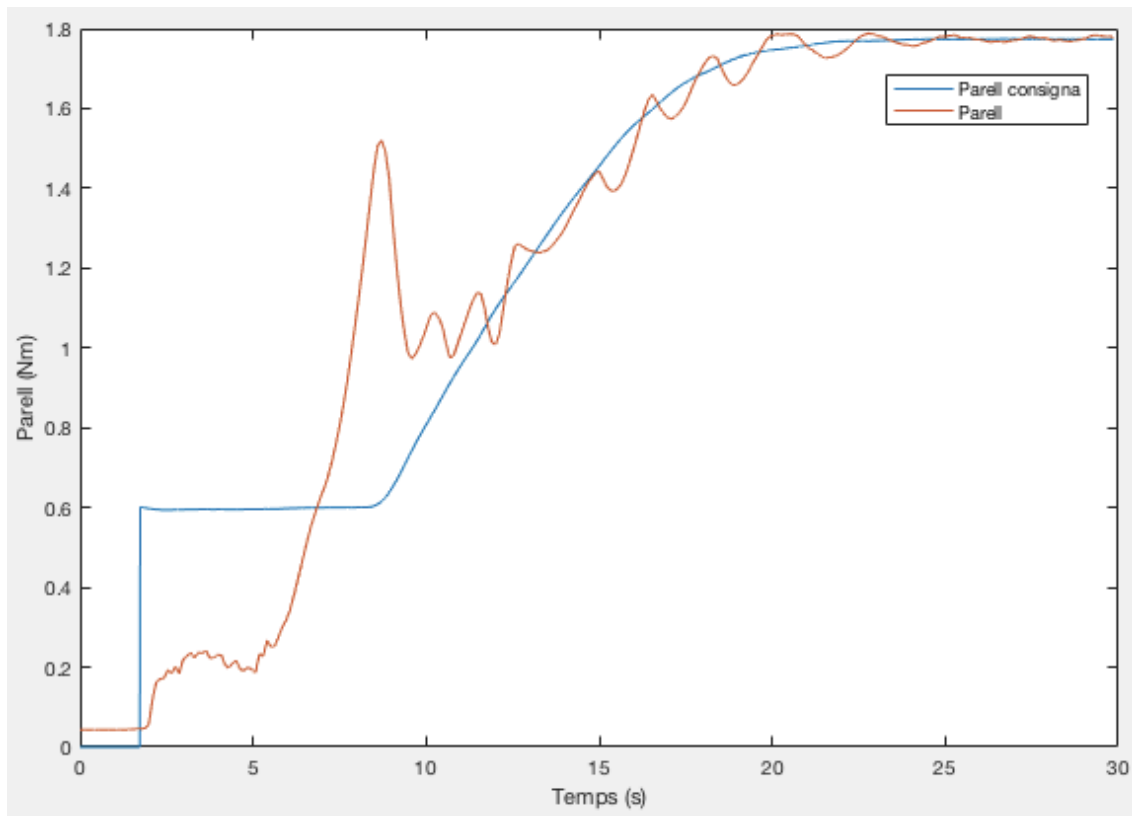


Gràfica 16 Resposta del sistema a parell lineal

2.6.3 Parell quadràtic

D'igual manera que l'apartat anterior en aquest cas s'aplica una consigna de velocitat lineal.

La gràfica (17) mostra la resposta a parell quadràtic, on es pot observar que no s'adapta a les especificacions descrites d'una corba de parell quadràtic. Això es pot veure més representat en la corba del parell de consigna, on la corba no es quadràtica. El problema és degut, a un càlcul matemàtic a l'hora de calcular el parell consigna desitjat. El que s'ha intentat implementar en el software desenvolupat és que a partir dels valors de parell en repòs, el parell a 50% de la velocitat nominal i el parell a velocitat nominal es crees la corba quadràtica.



Gràfica 17 Resposta del sistema a parell quadràtic

3. Proposta

El desenvolupament d'aquest projecte s'ha efectuat a partir d'un banc d'assaig reutilitzat que ja hi havia a les instal·lacions de la ESEIAAT, on s'ha aprofitat tots els elements possibles que tenia incorporats, tant mecànics com elèctrics i/o electrònics a causa d'un baix pressupost.

En aquest apartat es planteja una proposta del banc d'assaig intentant mantenir alguns elements que actualment el conformen. Aquesta proposta està dividida en els quatre apartats bàsics per la fabricació i el desenvolupament dels objectius d'aquest PFG:

- Part mecànica.
- Part elèctrica.
- Sensoreria.
- Controlador.

3.1 Part mecànica

Aquest banc d'assaig compta amb una estructura molt robusta i fixa on ja hi ha incorporat el motor de CC, la sensoreria i una petita estructura per incorporar el motor que va acoblat al motor de CC, per tant, es pot reutilitzar i afegir algunes modificacions.

El problema principal d'aquesta bancada és la dificultat que té a l'hora del seu transport i la no implementació dels elements de control instal·lades en ell, és per això que es proposa tenir una estructura més versàtil i transportable per millorar la comoditat a l'hora de realitzar els assajos. Les modificacions proposades són les següents:

- Incorporació de rodes amb fre per tindre una bancada mòbil i fàcil de transportar.
- Instal·lar una estructura per poder incorporar tots els elements de control. Aquesta estructura farà de suport per incorporar el quadre elèctric que compondrà tots els elements de control amb un suport per instal·lar el convertidor.

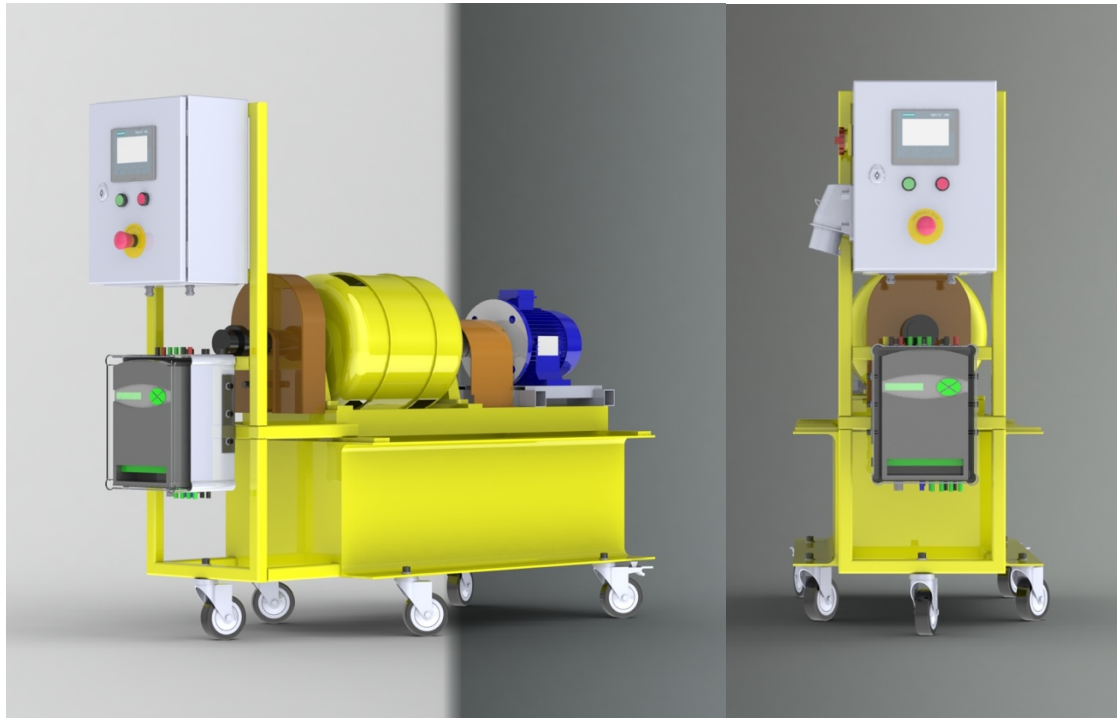


Fig. 53 Proposta part mecànica del banc d'assaig

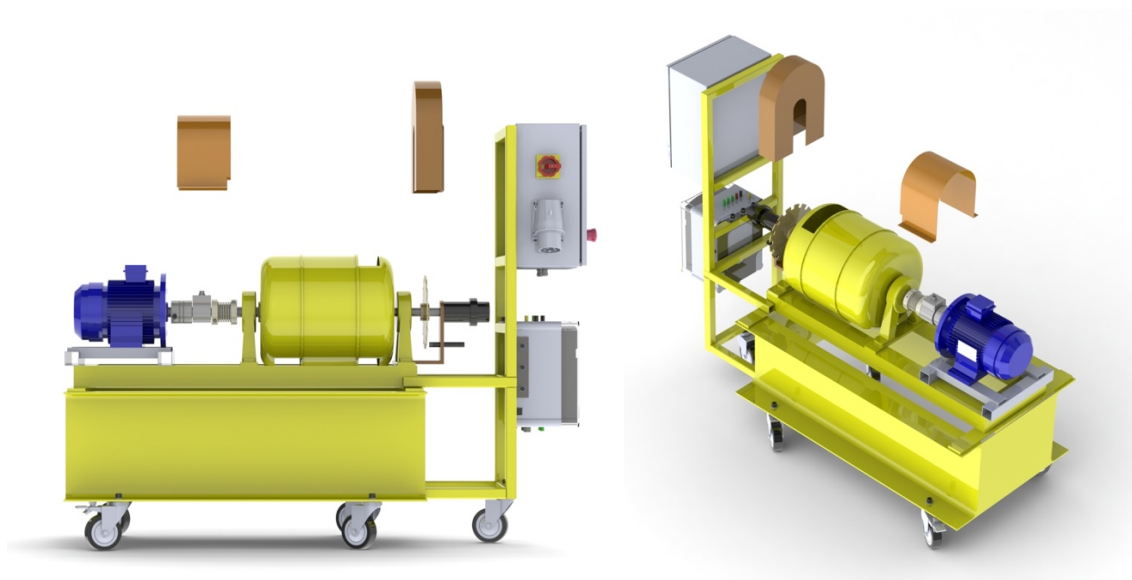


Fig. 54 Proposta part mecànica del banc d'assaig amb explosionat

3.2 Part elèctrica

Actualment els components elèctrics que conformen la bancada per l'alimentació i el seu control, no tenen una distribució i instal·lació fixa, això dificulta la seva utilització, ja que cada vegada que es vulgui realitzar algun assaig és necessari el connexionat i muntatge de tots els elements que el conformen, a causa d'aquest problema es crea una pèrdua de temps considerable a l'hora d'utilitzar el banc d'assaig.

Es proposa la unificació de tots els elements en un únic quadre elèctric on es disposarà d'un seccionador per donar alimentació a la bancada, les pertinents proteccions dels components, relés, actuadors, displays i controladors pel seu control, etc. L'esquema elèctric del quadre elèctric es troba al document de plànols i els components que el conformen estan al document de pressupost adjunt aquest projecte.

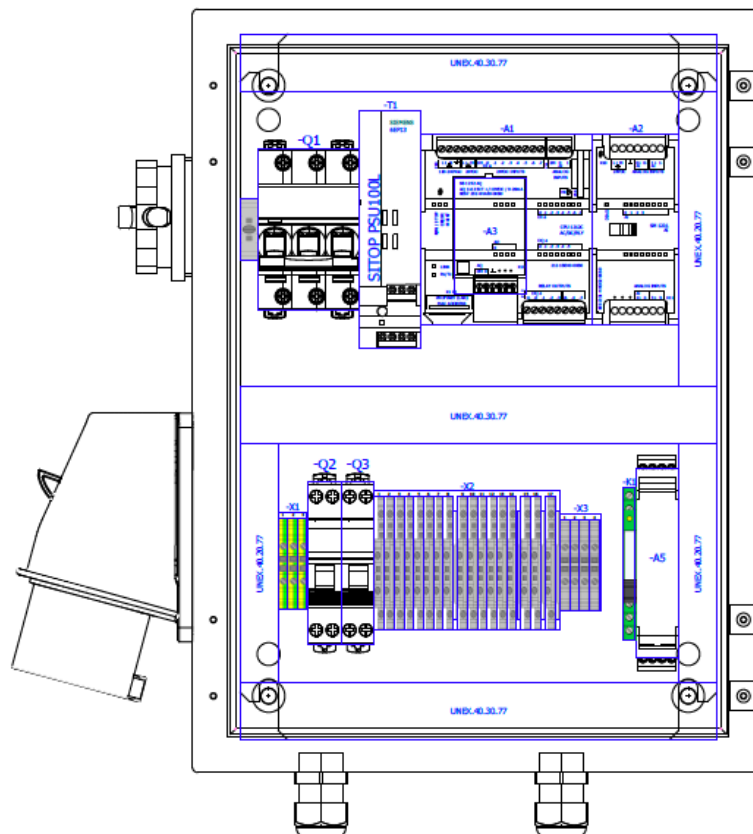


Fig. 55 Distribució d'elements del quadre elèctric

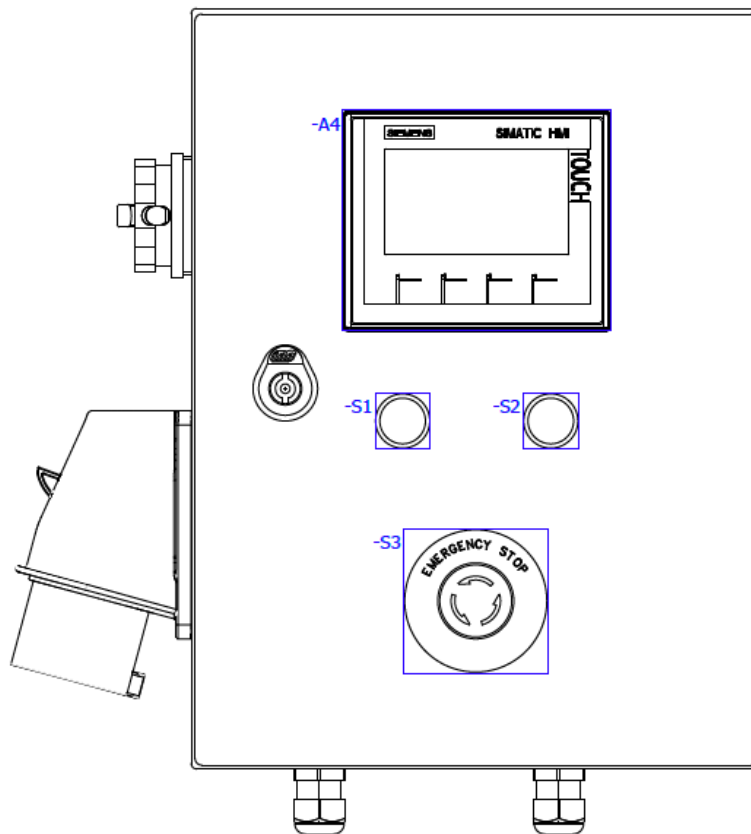


Fig. 56 Part frontal del quadre elèctric

3.3 Sensoreria

La sensoria en aquest projecte és una part fonamental, ja que gràcies a l'adquisició i processament dels senyals que proporcionen els sensors es realitza el control de parell desitjat del motor de CC.

El banc d'assaig porta incorporat tres sensors:

- Dinamo tacomètrica, per mesurar la velocitat.
- Inductiu, per mesurar la velocitat.
- Cèl·lula de càrrega, per mesurar el parell.

A partir d'aquests sensors es pot realitzar el control desitjat per l'estudi desenvolupat, ja que aquests sensors proporcionen els senyals necessàries que són la velocitat i el parell, per tant no seria necessària la implementació de nous sensors.

A mesura que ha anat avançant el projecte s'han tingut dificultats a l'hora de l'adquisició d'alguns senyals com són la cèl·lula de càrrega i el sensor inductiu.

La cèl·lula de càrrega instal·lada és de flexió, això provoca, que per la correcta mesura del parell, és necessària la distància entre l'eix del motor de CC i el punt de mesura d'aquest sensor, on a causa de la disposició i estructura d'aquest motor crea un error en la mesura d'aquesta distància. També la senyal de sortida d'aquest sensor s'ha de portar a un condicionador de senyal especial per poder adquirir-la correctament en el controlador utilitzat. A causa d'aquests problemes es planteja la instal·lació d'un transductor de parell on es solucionen els dos problemes que han sorgit amb la realització d'aquest estudi. La referència d'aquest component es troba al document de pressupost adjunt aquest projecte.



Fig. 57 Transductor de parell T22

Amb el sensor inductiu s'han tingut problemes a l'hora de la seva adquisició en el controlador *DS1104 R&D Controller Board*, ja que l'entrada que s'utilitza per captar el seu senyal, l'entrada d'encoder incremental amb connector d-Sub de 15-pins no funciona. Per la captació d'aquest senyal s'utilitzarà una entrada ràpida d'un controlador proposat en el següent apartat.

3.4 Controlador

El *DS1104 R&D Controller Board* utilitzat per realitzar l'adquisició i el control de tots els senyals és un controlador d'estudiants. A causa de les dimensions i la necessitat de tindre un ordinador connectat a ell és un problema per la proposta que s'ha plantejat, ja que es vol un banc d'assaig mòbil i versàtil.

Per tant, es proposa un controlador modular compacte de dimensions petites connectat a un panell HMI per poder visualitzar i controlar la bancada, gràcies a aquest autòmat petit i el panell és possible implementar-lo en el quadre elèctric. El controlador proposat és de la gama SIMATIC S7-1200 (Siemens), al ser modular permet la implementació d'interfícies d'E/S desitjades per l'usuari on també es possible connectar-lo a una pantalla SIMATIC HMI Basic a través de PROFINET i realitzar el panell virtual desitjat per l'usuari, aquesta pantalla disposa d'un connector USB on es poden emmagatzemar les dades dels assajos. El software utilitzat es el SIMATIC STEP 7 Basic, és possible la programació tant de l'autòmat com del panell a través d'aquest software. Gràcies a les quatre entrades HSC (High Speed Counting) que incorpora l'autòmat és possible la correcta adquisició del senyal del sensor inductiu. Les referències dels components descrits es troba al document de pressupost adjunt aquest projecte.



Fig. 58 Autòmat CPU-1212C i mòdul d'entrada analògiques



Fig. 59 Pantalla KTP 400

4. Conclusions

L'objectiu principal d'aquest projecte ha estat realitzar la simulació de càrregues mecàniques a partir d'un motor de corrent continu el qual està instal·lat en una bancada d'assaig reutilitzada de la universitat.

Durant la realització d'aquesta memòria la inexperiència en la plataforma de *dSpace* concretament en el programari *ControlDesk* ha dificultat el desenvolupament de la programació a partir del software *Matlab/Simulink*.

Una altra dificultat ha estat el control de la intensitat del camp de l'induït del motor de corrent continu amb el qual es pot controlar el parell aplicat al motor a partir del convertidor de corrent continu, ja que no es tenia un coneixement previ del funcionament d'aquest convertidor. Finalment, aquest problema s'ha pogut solucionar realitzant diferents proves experimentals.

L'adquisició de dades de la cèl·lula de càrrega per l'obtenció del parell ha suposat un contratemps perquè s'ha hagut de comprar un condicionador de senyal per tal d'amplificar i obtenir correctament aquest senyal, ja que en un principi no s'obtenia el senyal correctament perquè no es tenien els plànols del funcionament de l'amplificador de senyal que es tenia en un principi.

Observant els resultats obtinguts al llarg del projecte la simulació del parell constant i lineal a partir del desenvolupament d'un processador digital de senyals (DSP) i el control directe de l'usuari a partir de l'elaboració d'un SCADA s'ha realitzat amb èxit. Quant a la implementació del parell quadràtic, aquesta no s'ha pogut desenvolupar correctament, ja que hi ha hagut problemes de càlculs matemàtics en l'elaboració del software.

Per tal que aquesta plataforma docent de simulacions de càrregues mecàniques sigui més completa, és necessari l'elaboració d'una corba de parell a potència constant i la implementació de la proposta del nou banc d'assaig explicada anteriorment, a causa de l'antiguitat de la bancada utilitzada.

5. Bibliografia

- [1] Katsuhiko, Ogata. (2010). *Ingenieria de control moderna*. Quinta edición. Pearson educación, S.A., Madrid. ISBN: 978-84-8322-660-5, pp. 904.
- [2] Dorf, R. C. y Bishop, R.H. (2005). *Sistemas de control moderno*. 10ª edición. Pearson educación, S.A., Madrid. ISBN: 84-205-4401-9, pp. 928.
- [3] N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins. *Power electronics. Converters, Applications and design*. John wiley and sons., 1995.
- [4] W. Hart, Daniel. *Electrónica de potencia*. Pearson educación, S.A., Madrid, 2001. ISBN: 84-205-3179-0, pp. 472.
- [5] Pérez Magrané, Ramon. *Regulació automàtica, enginyeria tècnica industrial, especialitat electricitat*. Apunts regulació automàtica: UPC (ESEIAAT).
- [6] Masip Àlvarez, Albert. (9 de Febrer 2016). *Apunts bàsics de control automàtic*. UPC (ESEIAAT, departament d'enginyeria de sistemes, automàtica i informàtica industrial).
- [7] Nejari, Fatiha. *Tema 1.3: Disseny de controladors*. UPC (ESAI).
- [8] Zaragoza, Jordi. *Tema 3, Disseny de filtres butterworth*. UPC (ESEIAAT, departament d'enginyeria electrònica).
- [9] Alvarez Alvarado, Manuel Sebastian. *Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado: Control de velocidad por corriente de armadura*. Latin american journal of physics education, vol. 6, March 2012. ISSN: 1870-9095, pp. 155-161.
- [10] F. Rodrigo, B. Matías, E. Jorge [en línia]. *Modelación e identificación de un motor de C.C. de excitación independiente*. Universidad de Chile. Document d'internet disponible a: < https://etxesare.eu/euiti/tercero/ai/T_1-Modelacion_Motor_CC.pdf >
- [11] Mazzone, Virginia [en línia]. (Marzo 2002). *Controladores PID*. Universidad nacional de Quilmes (Automatización y control industrial). Document d'internet disponible a: < <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf> >

[12] [en línia], (17/11/99). *Diseño de filtros digitales (Parte 1)*. 5º curso – Tratamiento digital de señal. Document d'internet disponible a: < <http://www4.tecnun.es/asignaturas/tratamiento%20digital/tema8.pdf> >

[13] R. Marta, D. Helenca [en línia]. *Diseño y análisis de filtros en procesamiento de audio*. UOC (Universitat oberta de Catalunya). Document d'internet disponible a: < [https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Audio/Procesamiento_de_audio/Procesamiento_de_audio_\(Modulo_2\).pdf](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Audio/Procesamiento_de_audio/Procesamiento_de_audio_(Modulo_2).pdf) >

[14] Q. Nicanor, P. Kevin, S. Jogi [en línia]. (2002). *A tutorial introduction to control Systems development and implementation with dSPACE*. The Ohio State university (Dept. Of electrical engineering). Document d'internet disponible a: < <http://www2.ece.ohio-state.edu/~passino/dSPACEtutorial.doc.pdf> >

[15] Ghaffari, Azad [en línia]. (12/02/2012). *dSPACE and real-time interface in Simulink*. San Diego State university (Department of ECE). Document d'internet disponible a: < http://flyingv.ucsd.edu/azad/dSPACE_tutorial.pdf >

[16] A. Pernía, Marino [en línia]. (Septiembre 2011). *Conceptos básicos de máquinas de corriente continua*. Universidad nacional experimental del Táchira (Departamento de ingeniería electrónica). Document d'internet disponible a: < https://www.researchgate.net/publication/235752021_Conceptos_Basicos_de_Maquinas_de_corriente_continua >

[17] Carrasco Aráoz, Alfredo [en línia]. *Como obtener los parámetros de un motor de corriente continua e imán permanente*. Document d'internet disponible a: < https://www.academia.edu/32084465/Como_obtener_los_parámetros_de_un_motor_de_corriente_continua_e_imán_permanente >

[18] Manual de producto. *ER-PL / ER-PLX Accionamiento digital de CC*. Invensys eurotherm.

[19] MathWorks. Matlab help website. Document d'internet disponible a: < <https://es.mathworks.com> >

[20] dSPACE. DS1104 R&D Controller board. Document d'internet disponible a: < <https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/singbord/ds1104.cfm> >

[21] Grupo Epelsa [en línia]. Célula de carga LB2I. Document d'internet disponible a: <

http://www.grupoepelsa.com/documentacion/fichas_tecnicas/Ficha-tecnica-celula-de-carga-LB2I.pdf >

[22] Omega. Acondicionador de señal para cèl·lula de carga (TXDIN1600S).

Document d'internet disponible a: <

<https://es.omega.com/pptst/TXDIN1600S.html> >